

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ РУДНИКА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

А.В. Кашников¹, Ю.В. Круглов¹

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия,
e-mail: alexey.kashnikov@gmail.com

Аннотация: Рассмотрены вопросы, связанные с определением требуемого расхода воздуха для рабочей зоны рудника на основе прямых измерений параметров воздушной среды в конкретный момент времени. Традиционный подход к расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудника, характеризуется опосредованностью оценки качества воздушной среды и выполняется исходя из наиболее неблагоприятной ситуации при условии одномоментного ведения работ во всех рабочих зонах, что приводит к избыточному проветриванию и, как следствие, увеличению эксплуатационных затрат горнодобывающего предприятия. Внедрение систем автоматического управления проветриванием позволяет гибко регулировать объем подаваемого в шахту воздуха и распределять его в соответствии с текущими потребностями по участкам рудника, а наличие средств непрерывного измерения концентрации газов и температуры воздуха дает возможность определять параметры проветривания для поддержания соответствия воздушной среды требованиям безопасности. Применение аппарата нечеткой логики для оценки текущего состояния воздушной среды обеспечивает сбалансированность вентиляции рудника с точки зрения энергоэффективности и безопасности за счет определения рабочих диапазонов изменения параметров критериев качественного состава воздуха в соответствии с нормативными документами. Приведенные результаты шахтных испытаний динамического управления проветриванием рабочей зоны в условиях рудника 4РУ ОАО «Беларуськалий» за счет использования средств автоматического регулирования воздушными потоками наглядно показывают, что применение предлагаемого подхода к расчету требуемого количества воздуха позволяет не только эффективно обеспечить штатный режим проветривания, но и оперативно реагировать на увеличение концентрации газов в атмосфере рабочей зоны, заблаговременно предупреждая возникновение аварийных ситуаций.

Ключевые слова: расчет количества воздуха, система автоматического управления проветриванием, метан, нечеткая логика, вентиляционный регулятор, лава, вентилятор, концентрация газа, энергоэффективность.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 1021062110595-3-1.5.7).

Для цитирования: Кашников А. В., Круглов Ю. В. Определение параметров проветривания рабочей зоны рудника на основе нечеткой логики // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 68–82. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_68.

Fuzzy logic-based determination of ventilation parameters in active mining areas

A.V. Kashnikov¹, Yu.V. Kruglov¹

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: alexey.kashnikov@gmail.com

Abstract: The airflow rate in active mining areas is determined from the direct measurement of air quality parameters at the specific moment of time. This conventional approach to calculation of air volume required for mine ventilation features the indirectness of air quality evaluation on the assumption of the most unfavorable situation upon condition of simultaneous activity in all operating zones, which results in excessive airing and, as a consequence, in extra operating expenditures. The automated ventilation control enables flexible adjustment of mine air volume and airflow distribution as consistent with the current needs per mining areas, while the instrumentation for the continuous measurement of air temperature and gas concentration allows determining appropriate ventilation parameters for the air quality to meet the safety standards. The fuzzy logic application to evaluation of the current air quality ensures well-balanced mine ventilation in terms of safety and energy efficiency, owing to ranging the air quality criteria as consistent with regulatory documents. The mine testing data on ventilation monitoring in an active mining zone of Belaruskali's Mine 4 using automated airflow control facilities demonstrate that the proposed approach to the required air volume calculation effectively provides the routine ventilation mode and ensures a real-time response to gas concentration build-up in mine air to prevent accidents in active mining zones in advance.

Key words: air volume calculation, automated ventilation control, methane, fuzzy logic, airing controller, longwall, fan, gas concentration, energy efficiency.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under State Contract No. 075-03-2021-374 dated 29 December 2020, Registration Number 1021062110595-3-1.5.7.

For citation: Kashnikov A. V., Kruglov Yu. V. Fuzzy logic-based determination of ventilation parameters in active mining areas. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5):68-82. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_68.

Введение

Традиционный подход к определению требуемого количества воздуха для проветривания рудника предполагает расчет максимальной потребности по наиболее значимому фактору, исходя из предположения одномоментного ведения горных работ во всех рабочих зонах. Вместе с тем при определении потребности в воздухе для конкретной рабочей зоны необходимо учитывать ряд дополнительных требований. Так, требуется подавать до-

полнительный объем воздуха для недопущения возникновения рециркуляции на вспомогательном вентиляторе (до 50%), компенсации утечек (до 25%) и учета одномоментной работы оборудования в рабочей зоне (до 20%) [1]. Кроме того, к этому необходимо добавить возможные утечки при доставке заданного количества воздуха по вентиляционной сети рудника.

В результате общее подаваемое количество воздуха более чем в два раза

превышает реальную потребность собственно рабочих зон.

Однако картина горных работ в каждый момент времени не является однородной. Во-первых, не во всех рабочих зонах ведутся горные работы. Это может быть обусловлено как проведением плановых или внеплановых ремонтных работ, так и вынужденным простоем в силу необходимости снижения производительности рудника, вызванной техническими (аварийные ситуации, замена транспортного или подъемного оборудования) или экономическими (колебания спроса на мировых рынках, торговые ограничения и др.) причинами. Во-вторых, сами горные работы зачастую носят циклический характер. Для полиметаллических рудников можно выделить такие фазы, как бурение и закладка взрывчатых веществ, проведение взрывных работ и отгрузка отбитой руды. Каждая фаза различается по виду используемого оборудования и местонахождению персонала. Немаловажным является и то обстоятельство, что одно и то же оборудование может работать сначала в одной рабочей зоне, а затем в другой в течение одной и той же фазы цикла.

Проведенный анализ работы рудника Kidd Creek за 15 месяцев показал, что при ежемесячном расчете количества воздуха среднее требуемое значение для рудника составляет $983 \text{ м}^3/\text{с}$, при еженедельном — $681 \text{ м}^3/\text{с}$, при ежедневном — $400 \text{ м}^3/\text{с}$ (расчет производился на основе фактически производимых работ). Таким образом, ежедневная адаптация вентиляционной системы позволяет более чем в два раза снизить общую потребность в воздухе [2].

Удельный вес расхода электроэнергии на вентиляцию составляет до 40% в энергопотреблении рудника [3, 4]. При этом потребляемая вентилятором мощность находится в кубической зависимости от расхода воздуха [5, 6]. Поэтому

любое, даже незначительное, снижение требуемого расхода воздуха существенно уменьшает затраты на проветривание рудника. Снижение энергопотребления является вкладом не только в повышение рентабельности производства, но и в снижение выбросов парниковых газов в атмосферу.

Подход к динамическому управлению проветриванием рудников получил название «вентиляция по требованию».

Выделяется пять возможных уровней работы таких систем [7]:

1. ручное управление;
2. посменное регулирование;
3. событийное управление;
4. управление на основе данных системы позиционирования;
5. управление на основе текущих параметров воздушной среды.

Ручное управление предполагает непосредственное задание параметров работы устройств системы вентиляции:

- для вентиляторов — частота вращения рабочего колеса и угол установки лопаток;
- для регуляторов — степень открытия (например, за счет угла поворота регулирующих створок).

Управление на основе посменного планирования предполагает предварительное определение видов работ, которые будут производиться в рабочей зоне в конкретную смену, на основе чего осуществляется расчет минимально требуемых значений количества воздуха. Система в этом случае должна обеспечить рассчитанные расходы в каждой рабочей зоне.

Событийное управление подразумевает автоматическую реакцию системы на набор предопределенных критических событий. Такими событиями могут выступать увеличение концентрации газов выше предельно допустимого уровня, снижение расхода воздуха в рабочей зоне ниже минимально требуемого уровня.

Управление на основе данных системы позиционирования выполняется с учетом информации о местоположении оборудования и персонала, предоставляемых системой позиционирования. Изменение подачи воздуха в рабочую зону происходит в случае входа/выхода людей и оборудования из нее. Дополнительно могут учитываться данные о текущих выбросах дизельного оборудования, которые зависят от степени его загрузки.

Управление на основе текущих параметров воздушной среды основывается на непрерывном анализе данных с датчиков концентрации газов и температуры для изменения объема подаваемого в рабочую зону воздуха. Система адаптирует работу вентиляционного оборудования таким образом, чтобы предельно допустимые концентрации газов и пороговые значения температуры не были превышены.

Некоторые исследователи отмечают, что реальное проветривание по требованию реализуется на двух последних уровнях, на которых оценивается именно фактическая, а не ожидаемая потребность в воздухе. Подробный анализ сокращения энергозатрат на проветривание при переходе от уровня к уровню на примере рудника Totten Mine (Vale, Канада) приведен в [8], где показано, что интеграция с системой позиционирования позволяет уменьшить энергопотребление на величину до 60%. Оценка периода окупаемости внедрения подобных систем приведена в [9].

Вместе с тем необходимо отметить, что любое изменение режима проветривания не происходит моментально и требуется время для того, чтобы воздушные потоки стабилизировались после изменения параметров работы вентиляционного оборудования [10]. В связи с этим реализация систем динамического управления проветриванием должна в первую очередь обеспечивать устойчивое про-

ветривание рабочих зон в требуемом объеме.

Внедрение систем автоматического управления проветриванием (САУП) на рудниках ОАО «Беларуськалий» [11] позволило реализовать стратегию посменного регулирования, при котором в зависимости от типа смены (добычная или ремонтная) обеспечивается подача на регулируемые направления требуемого предварительно рассчитанного объема воздуха [12]. Алгоритмы управления вентиляционным оборудованием позволяют эффективно перераспределять воздух в шахте за счет автоматических регуляторов [13] и минимизировать энергопотребление главной вентиляторной установки (ГВУ) [14]. Также разработаны алгоритмы энергоэффективного управления параллельно работающими ГВУ для рудников сложной топологии [15].

Очевидно, наиболее точно фактическую потребность в воздухе можно определить на основе прямых измерений параметров воздушной среды (пятый уровень). С точки зрения требований безопасности качество воздушной среды определяется набором критериев. Каждый критерий определяется множеством допустимых значений определенного параметра, характеризующего воздушную среду в рабочей зоне.

Множество критериев регламентировано нормативными документами по обеспечению безопасности при ведении горных работ.

Можно выделить следующие критерии:

- безопасные концентрации взрывоопасных газов (метан, водород);
- безопасные концентрации ядовитых газов (угарный газ, сернистые соединения, окислы азота и др. в зависимости от условий конкретного месторождения и используемого оборудования);
- минимальная концентрация кислорода;

- предельная температура воздуха;
- предельное содержание твердых частиц (пыли).

Фактически допустимые диапазоны критериев определяют условия обеспечения безопасного ведения горных работ. Общий принцип управления проветриванием состоит в обеспечении подачи такого количества воздуха в рабочую зону, чтобы данные критерии соблюдались, т.е. чтобы значения того или иного параметра находились в определенном интервале значений. Однако ориентация только на границы интервалов делает систему либо неэффективной (при удержании значений параметров вблизи нулевой отметки), либо ненадежной и опасной (при реагировании только на достижение предельных значений). При этом если в случае концентрации взрывоопасного газа нахождение значения вблизи ПДК само по себе является критической ситуацией, то значение температуры на максимально разрешенном уровне является приемлемым.

При расчете требуемого количества воздуха для проветривания рабочей зоны применяется опосредованное определение характеристик воздуха. В качестве факторов, по которым выполняется расчет требуемого количества воздуха, используются такие, как количество людей в рабочей зоне, количество и мощность работающих дизельных двигателей, производительность добычного оборудования и газоносность пластов, теплотехнические параметры работы оборудования и температура массива, состав взрывчатых веществ. Данный подход позволяет рассчитать ожидаемое, а не требуемое в данный момент количество воздуха для рабочей зоны.

С позиции эффективной организации проветривания система управления должна удерживать значения параметров в некоторых поддиапазонах допустимых интервалов. Определение подобного «ра-

бочего диапазона» зависит от многих факторов и само по себе является неформальной оценкой, основанной на опыте экспертов, а также накопленной статистике.

Для повышения адекватности и эффективности существующего подхода к определению текущей потребности в воздухе необходима формализация понятия состояния воздушной среды рабочей зоны, с помощью которого будет определяться степень соответствия текущих условий соотношению безопасность ведения работ/эффективность проветривания.

Применение аппарата нечеткой логики для определения понятий и реализации алгоритмов управления позволяет преодолеть сложности, связанные с различными видами неопределенности. Мировой опыт демонстрирует успешное решение задач, связанных с управлением качеством воздушной среды в различных сферах народного хозяйства, на основе нечеткого управления. Так, в [16] приводится пример использования нечеткого регулятора для управления температурой и влажностью в теплице для выращивания овощей за счет изменения частоты вращения вентилятора, производительности воздушного увлажнителя и интенсивности работы обогревателя. Управление микроклиматическими параметрами для обеспечения нормативных условий состава и параметров воздушной среды в больничной операционной палате рассмотрено в [17]. Наиболее сложная ситуация управления параметрами воздушной среды рассматривается в контексте обеспечения нормативных условий в цехах обогатительной фабрики за счет управления приточно-вытяжной системой вентиляции [18]: контролируемые параметрами здесь являются температура, влажность и концентрация вредных примесей. Кроме того, алгоритмы нечеткого управления шахтным вентиляционным оборудованием рассматрива-

ются как инструмент повышения устойчивости функционирования САУП [19].

Целью работы является разработка модели расчета требуемого расхода воздуха в рабочей зоне в текущий момент времени на основе прямых измерений показателей качества воздушной среды, обеспечивающей баланс безопасности ведения работ и эффективности проветривания, с использованием аппарата нечеткой логики.

Методология

Для формализации понятий состояния воздушной среды воспользуемся аппаратом нечеткой логики.

Пусть K — множество критериев, определяющих безопасный уровень воздушной среды в рабочей зоне; $K \in K$ — конкретный критерий; ξ^K — определяющий критерий параметр; I_{ξ^K} — допустимый диапазон изменения данного параметра.

Например, для взрывоопасных или ядовитых газов параметром является концентрация c (%) соответствующего газа, а допустимый диапазон определяется как

$$I_c = [0; c^{ПДК}].$$

Для определения понятия состояния воздушной среды рабочей зоны введем понятие состояния воздушной среды рабочей зоны по критерию $K \in K$, под которым будем понимать степень соответствия текущего значения параметра критерия соотношению безопасности работ/эффективности проветривания.

Под неэффективным понимается такое состояние рабочей зоны по критерию K , при котором значение параметра ξ^K значительно удалено от порогового значения. Иными словами, существует возможность снижения объема подаваемого в рабочую зону воздуха без снижения уровня безопасности ведения горных работ.

Под опасным понимается такое состояние рабочей зоны по критерию K , при котором значение параметра ξ^K находится вблизи предельного значения внутри допустимого интервала (либо за его пределами). Хотя в данном состоянии формально критерий K может соблюдаться, необходимо увеличивать поступление воздуха в рабочую зону, чтобы параметр не оказался за пределами допустимого диапазона значений.

Под рабочим понимается такое состояние рабочей зоны по критерию K , при котором значение параметра ξ^K находится в пределах, не требующих изменения режима проветривания, так как он сбалансирован с точки зрения соотношения безопасности работ/эффективности проветривания.

Для управления неопределенностью и формализации определений состояния воздушной среды рабочей зоны по критерию K введем соответствующие лингвистические переменные, принимающие значения «Неэффективное», «Рабочее», «Опасное», определяемые соответствующими нечеткими множествами NEF , $WORK$, DAN . Очевидно, функции принадлежности для указанных множеств являются функциями параметра ξ^K критерия K .

Так, для параметров концентрации газов функции принадлежности для указанных множеств могут определяться следующим образом:

$$\mu_{NEF}(c) = \begin{cases} -\frac{1}{\alpha}c + 1, c \in [0; \alpha] \\ 0, c > \alpha \end{cases}$$

$$\mu_{DAN}(c) = \begin{cases} 0, c < c^{ПДК} - \alpha \\ \frac{1}{\alpha}c + \frac{c^{ПДК} - \alpha}{\alpha}, \\ c \in [c^{ПДК} - \alpha; c^{ПДК}] \\ 1, c > c^{ПДК} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{WORK}}(c) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} c, c \in [0; \alpha] \\ 1, c \in [\alpha; c^{\text{ПДК}} - \alpha] \\ -\frac{1}{\alpha} c + \frac{1}{\alpha}, c \in [c^{\text{ПДК}} - \alpha; c^{\text{ПДК}}] \\ 0, c > c^{\text{ПДК}} \end{cases}$$

Параметр α выбирается эмпирически. Чем больше значение параметра, тем более узкий диапазон значений для рабочего состояния.

Схематичное изображение функций принадлежности показано на рис. 1.

Будем считать, что воздушная среда не находится в некотором состоянии X по критерию K , если $\mu_X(\xi^K) = 0$, и наоборот, воздушная среда находится в состоянии X , если $\mu_X(\xi^K) > 0$.

Из графиков видно, что формально состояние по критерию может быть одновременно и неэффективным, и рабочим, либо и опасным, и рабочим. Такое размытие границ между состояниями позволяет реализовать более сглаженное управление.

Сформулируем определения для различных значений состояния S воздушной среды рабочей зоны (в целом по всем параметрам) таким образом, чтобы воздушная среда в один момент времени находилась только в одном состоянии.

Пусть Ξ – вектор параметров по всей совокупности критериев K .

Под неэффективным понимается такое состояние воздушной среды рабочей зоны, при котором состояние воздушной среды рабочей зоны по каждому критерию является неэффективным. Степень принадлежности определяется как минимум соответствующих значений по всем критериям. Формально:

$$\forall K \mu_{\text{NEF}}(\xi^K) > 0 \Rightarrow S = \text{NEF},$$

$$\mu_{\text{NEF}}(\Xi) = \min_{K \in K} \mu_{\text{NEF}}(\xi^K) \quad (2)$$

Под рабочим понимается такое состояние рабочей зоны, при котором состояние воздушной среды рабочей зоны по всем критериям не является опасным, при этом хотя бы по одному критерию является рабочим и не является неэффективным. Степень принадлежности определяется как максимум соответствующих значений по всем критериям. Формально:

$$\exists K (\mu_{\text{WORK}}(\xi^K) > 0 \ \& \ \mu_{\text{NEF}}(\xi^K) = 0) \ \& \ \forall K \mu_{\text{DAN}}(\xi^K) = 0 \Rightarrow S = \text{WORK}, \quad (3)$$

$$\mu_{\text{WORK}}(\Xi) = \max_{K \in K} \mu_{\text{WORK}}(\xi^K)$$

Под опасным понимается такое состояние рабочей зоны, при котором состояние воздушной среды рабочей зоны

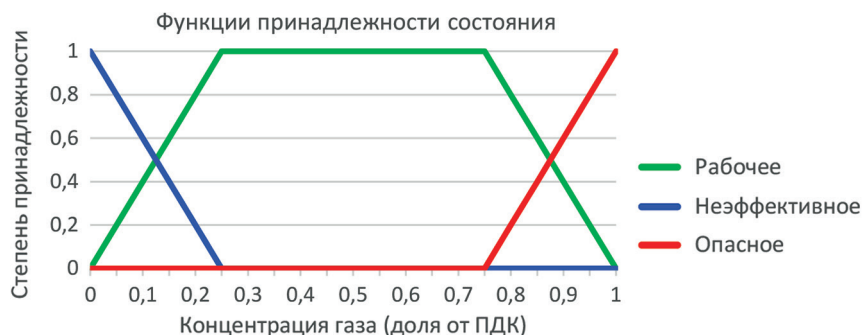


Рис. 1. Функции принадлежности для состояния воздушной среды рабочей зоны по параметру концентрации газа ($\alpha = 0,25$)

Fig. 1. Membership functions for a fuzzy variable of air conditions in a working area determined by gas concentration ($\alpha = 0,25$)

хотя бы по одному критерию является опасным. Степень принадлежности определяется как максимум соответствующих значений по всем критериям. Формально:

$$\exists K \mu_{DAN}(\xi^K) > 0 \Rightarrow S = DAN, \quad (4)$$

$$\mu_{DAN}(\Xi) = \max_{K \in K} \mu_{DAN}(\xi^K)$$

Данные выше определения предполагают возможность нахождения воздушной среды рабочей зоны только в одном состоянии (с некоторой ненулевой степенью принадлежности), так как при вычислении итогового значения требуемого расхода воздуха недопустимо смешивать численные значения параметров различных критериев в силу их разнородности.

Задача определения требуемого расхода воздуха при оценке текущего состояния воздушной среды в конкретной точке вентиляционной сети сводится к определению такой величины ΔQ^{mp} , на которую необходимо скорректировать текущее значение расхода $Q(t)$ (m^3/c), чтобы состояние воздушной среды стало рабочим:

$$Q^{mp}(t) = Q(t) + \Delta Q^{mp}. \quad (5)$$

Исходя из данных выше определений (2)–(4) и общего вида графика функций принадлежности (см. рис. 1), расчет величины коррекции ΔQ^{mp} осуществляется по максимальному значению функции принадлежности параметра критериев, по которым воздушная среда находится в опасном состоянии при общем опасном состоянии, либо по минимальному значению функции принадлежности параметра критериев, по которым среда находится в неэффективном состоянии при общем неэффективном состоянии. Таким образом, расчет осуществляется по параметру такого критерия $K \in K$, для которого $\mu_X(\xi^K) = \mu_X(\Xi)$, где X – текущее состояние воздушной среды рабочей зоны.

Ввиду того, что разные критерии предполагают различную динамику изменения, при определении необходимого приращения расхода воздуха необходимо учитывать дифференциальную составляющую изменения значения параметра. Например, концентрация газа может резко увеличиться вследствие вскрытия локальных скоплений во время горных работ, и система должна на это оперативно реагировать. При этом важна и тенденция изменения параметра.

Рассмотрим нечеткий регулятор, входными параметрами для которого являются текущее состояние рабочей зоны по выбранному параметру и изменение значений данного параметра, а выходным – требуемое приращение расхода воздуха.

Введем следующие входные нечеткие переменные: S^K – состояние рабочей зоны по критерию K ; $\Delta \xi^K$ – изменение параметра.

Определим следующие терм-множества для входных переменных:

$$S^K - \{NEF, WORK, DAN\};$$

$$\Delta \xi^K - \{N, NZ, Z, PZ, P\}.$$

Введем выходную переменную: ΔQ^{mp} – приращение требуемого расхода воздуха.

Определим следующее терм-множество для выходной переменной:

$$\Delta Q^{mp} - \{NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL\}.$$

Функции принадлежности нечетких множеств для переменной $\Delta \xi^K$ задаются Гауссовыми функциями. Обозначения нечетких множеств являются традиционными: литере N соответствует отрицательное изменение переменной; P – положительное; L, M, S, Z характеризуют степень изменения переменной (большая, средняя, малая, близкая к нулю/нулевая).

Правила для расчета приращения требуемого расхода воздуха могут быть сформулированы следующим образом:

- в случае опасного состояния воздушной среды требуемый расход воздуха должен быть увеличен;
- в случае неэффективного состояния воздушной среды требуемый расход воздуха должен быть уменьшен;
- в случае рабочего состояния воздушной среды требуемый расход воздуха остается без изменения;
- в случае выраженной отрицательной динамики параметра при опасном состоянии воздушной среды требуемый расход воздуха остается без изменения;
- в случае выраженной положительной динамики параметра при неэффективном состоянии воздушной среды требуемый расход воздуха остается без изменения.

Последние два правила, по сути, означают ожидание, что система придет в рабочее состояние без изменения требуемого расхода воздуха.

В соответствии со сформулированными правилами база правил (таблица) имеет симметричный вид.

В качестве алгоритма нечеткого вывода используется вывод Мамдани [20].

При расчете итогового значения $Q^{mp}(t)$ необходимо учитывать, что должно выполняться условие

$$Q_{\min} \leq Q^{mp}(t) \leq Q_{\max}, \quad (6)$$

где Q_{\min} , Q_{\max} — соответственно минимальное и максимальное допустимое значение расхода воздуха в выработках, определяемые требованиями безопасности.

База правил для определения приращения требуемого расхода воздуха
Rule base for computation of required airflow increment

	NEF	WORK	DAN
<i>N</i>	<i>NL</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
<i>NZ</i>	<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>
<i>Z</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>
<i>PZ</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PM</i>
<i>P</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>PL</i>

Важной особенностью приведенного алгоритма расчета является то, что система не пытается привести конкретный параметр к некоторому фиксированному значению. Целью алгоритма является возможность нахождения значений параметров всех критериев в рамках диапазонов, создающих в совокупности баланс безопасности работы и эффективности проветривания.

Результаты

В целях оценки возможностей использования системы автоматического управления проветриванием для обеспечения требуемых параметров воздушной среды рабочей зоны были проведены испытания, позволяющие исследовать влияние изменения режима проветривания на состояние воздушной среды добычного участка. Испытания проводились 23 октября 2018 г. на лаве № 8 рудника 4РУ ОАО «Беларуськалий». Для регулирования подачи воздуха в лаву была установлена автоматическая вентиляционная дверь (АВД [20]) на вентиляционном штреке лавы № 8 (рис. 2).

Выделение газов происходит при разрушении горного массива непосредственно во время работы комбайна, а также в моменты передвижения крепи лавы. Максимальная концентрация метана в атмосфере лавы достигается в месте сопряжения лавы с вентиляционным штреком, так как воздух к этому моменту проходит максимальное расстояние вдоль очистного забоя, а также в концевой части лавы ввиду его традиционно недостаточно эффективного проветривания. Исходя из этих соображений, были установлены датчики концентрации метана (см. рис. 2).

Для проведения испытаний был реализован упрощенный вариант регулирования подачи воздуха в лаву только за счет изменения степени открытия автоматической вентиляционной двери (АВД),

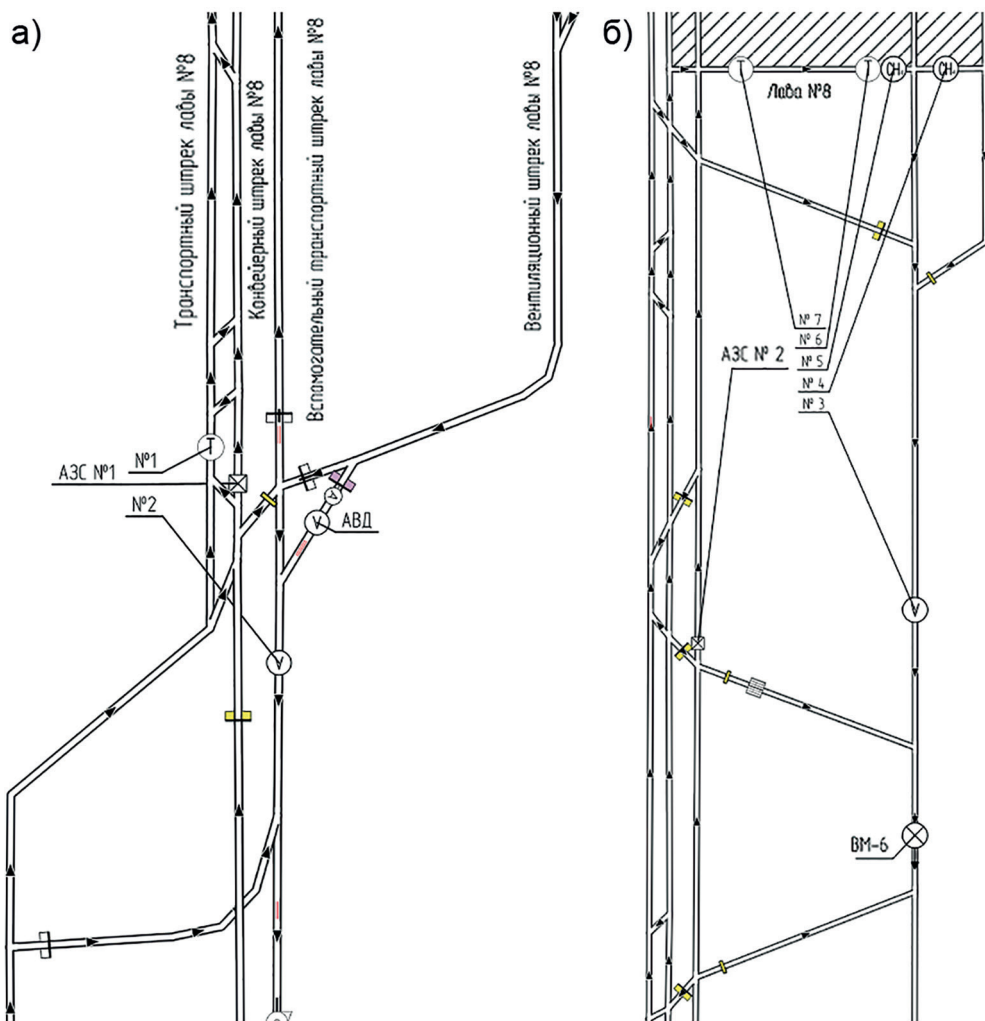


Рис. 2. Схема расположения вентиляционного регулятора на вентиляционном штреке (а), датчиков концентрации метана (б) на лаве № 8

Fig. 2. Placement of an automatic ventilation regulator on a ventilation roadway (a) and methane sensors (b) in the longwall face no. 8

выведенной из общего контура управления САУП. В качестве оценки текущего состояния воздушной среды использовалось измеренное значение концентрации метана. Предельное значение устанавливается в соответствии с требованиями безопасности равным 10% НКПР. В качестве базового требуемого расхода воздуха использовалось значение, вычисленное в соответствии с инструкцией по расчету количества воздуха.

В рамках испытаний отслеживались изменения параметров работы АВД и значений концентрации газа на установленных датчиках. При проведении испытаний на датчики контроля метана распылялся газ из мешка с проверочной смесью, после чего концентрация газа в месте установки датчика возвращалась к уровню концентрации в лаве без искусственного завышения. Концентрация газа в проверочной смеси составляла

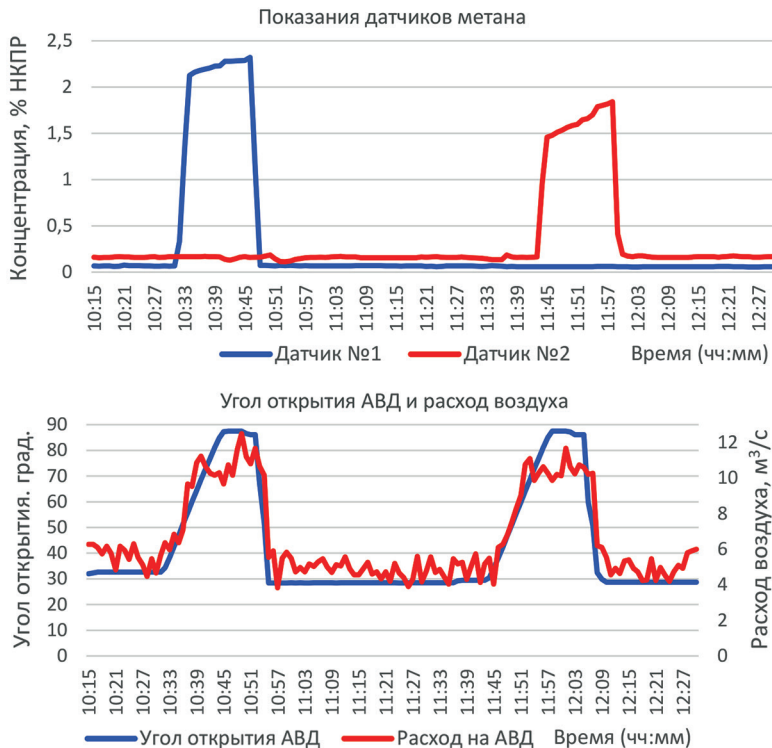


Рис. 3. Изменение параметров проветривания лавы в ходе испытаний: концентрация метана на двух датчиках (а); угол открытия установленной АВД и расход воздуха на ней (б)

Fig. 3. Varying of longwall face ventilation parameters during test operations: methane concentrations monitored on two sensors (a); opening angle of the automatic ventilation regulator and its airflow (b)

0,5%, время распыления газа 15 мин. По результатам испытаний установлено, что при обнаружении концентрации газа выше 0,5% НКПР на любом из датчиков АВД постепенно увеличивает угол открытия для обеспечения увеличения подачи воздуха в лаву (рис. 3). После того, как уровень концентрации газа опускается ниже 0,5% НКПР, расход воздуха на АВД снижается (с некоторой задержкой), и в итоге устанавливается в базовое значение. Диапазон изменения расхода воздуха составил от 4 до 12,5 м³/с, угла открытия АВД — от 28° до 90°.

Обсуждение

Испытания демонстрируют, что система автоматического управления про-

ветриванием может оперативно реагировать на переход состояния воздушной среды в рабочей зоне по контролируемому параметру в опасное состояние и возвращаться в исходное положение, когда состояние становится рабочим.

Очевидно, возможность применения описываемого подхода в чистом виде затруднительна в силу технических ограничений, так как не по всем критериям параметры могут быть измерены напрямую (либо их измерение нецелесообразно). Поэтому на практике должен использоваться комбинированный способ расчета, при котором на основе опосредованных характеристик вычисляется базовое значение требуемого расхода воздуха (исходя из наиболее неблагоприятной ситуации), которое затем кор-

ректируется в цикле управления САУП на основе фактических значений параметров.

Пусть \check{K} — множество критериев, параметры которых не могут быть измерены напрямую, $\check{K} \subset K$; Q_K^{mp} — требуемый расход воздуха, вычисленный для критерия K .

В этом случае на формулу (5) накладывается дополнительное ограничение:

$$Q^{mp}(t) \geq \max_{K \in \check{K}} Q_K^{mp}. \quad (7)$$

Иными словами, скорректированное значение расхода воздуха не должно быть меньше, чем требуемое значение, вычисленное для критериев, параметры которых не могут быть измерены напрямую.

Заключение

Использование понятия состояния воздушной среды рабочей зоны и его определение при помощи аппарата нечеткой логики позволяет разработать модель рас-

чета требуемого расхода воздуха в текущий момент времени, обеспечивающую баланс безопасности ведения работ и эффективности проветривания.

Алгоритм расчета требуемого расхода воздуха на основе прямых измерений качества воздушной среды позволяет учесть динамику изменения показателей, приоритизировать обеспечение безопасности над энергоэффективностью, а также перейти от жесткого определения заданного расхода к плавающему значению в рамках допустимого интервала.

Использование традиционного подхода к определению требуемого расхода воздуха с коррекцией на основе прямых измерений позволяет гибко подходить к реализации стратегии проветривания рудников в зависимости от их технической оснащенности, а также обеспечивать устойчивость управления системой вентиляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R.* Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings / *Proceedings of Montreal Energy & Mines*. Montreal, Canada. 2007, pp. 255–263.
2. *Hardcastle S., Kocsis C., Li G.* Analyzing ventilation requirements and the utilization efficiency of the Kidd Creek mine ventilation system / *12th U.S.-North American Mine Ventilation Symposium*. Reno, NV, USA. 2008, pp. 27–36.
3. *Семин М. А., Гришин Е. Л., Левин Л. Ю., Зайцев А. В.* Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // *Записки Горного института*. — 2020. — Т. 246. — С. 623–632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.
4. *Moreau K., Laamanen C., Bose R., Shang H., Scott J. A.* Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021, vol. 31, no. 6, pp. 1159–1167. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.11.009.
5. *Semin M. A., Levin L. Y., Maltsev S. V.* Development of automated mine ventilation control systems for belarusian potash mines // *Archives of Mining Sciences*. 2020, vol. 65, no. 4, pp. 803–820. DOI: 10.24425/ams.2020.135178.
6. *Acuña E., Lowndes I.* A review of primary mine ventilation system optimization // *Interfaces*. 2014, vol. 44, no. 2, pp. 163–175. DOI: 10.1287/inte.2014.0736.
7. *Chatterjee A., Zhang L., Xia X.* Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff // *Applied Energy*. 2015, vol. 146, pp. 65–73. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.134.

8. Acuña E., Allen C. Ventilation control system implementation and energy consumption reduction at Totten Mine with Level 4 Tagging and future plans / Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology. Sudbury, Canada. 2017, pp. 89 – 95. DOI: 10.36487/ACG_rep/1710_06_Acuna.

9. Acuña E., Feliú A. Considering ventilation on demand for the developments of the New Level Mine Project, El Teniente / A Deep Mining 2014: Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining. Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia. 2014, pp. 813 – 821. DOI: 10.36487/ACG_rep/1410_59_Acuna.

10. De Vilhena C. L., Margarida da Silva J. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand // Mining Technology. 2019, vol. 129, no. 1, pp. 1 – 8. DOI: 10.1080/25726668.2019.1651581.

11. Levin L. Y., Semin M. A. Conception of automated mine ventilation control system and its implementation on Belarussian potash mines / Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium. Colorado, USA. 2017, pp. 17.1 – 17.8.

12. Гришин Е. Л., Накаряков Е. В., Трушкова Н. А., Санникович А. Н. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 103 – 108. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15.

13. Кашников А. В., Левин Л. Ю. Применение методов машинного обучения при реализации систем автоматического управления проветриванием шахт и рудников / XX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2017). Сборник докладов. Т. 1. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – С. 553 – 556.

14. Кашников А. В., Круглов Ю. В. Оценка энергопотребления главных вентиляторных установок подземных рудников в условиях неоднозначного определения зон их влияния // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 4. – С. 72 – 84. DOI: 10.15372/FTPRPI20220408.

15. Мальцев С. В., Казаков Б. П., Семин М. А. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 4. – С. 283 – 291.

16. Hameed I. A. Simplified architecture of a type-2 fuzzy controller using four embedded type-1 fuzzy controllers and its application to a greenhouse climate control system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019, vol. 223, no. 5, pp. 619 – 631. DOI: 10.1243/09596518JSCE708.

17. Saritas I., Etik N., Allahverdi N., Sert I. Fuzzy expert system design for operating room air-condition control systems // Expert Systems with Applications. 2007, vol. 36, no. 6, pp. 23 – 30. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.02.028.

18. Фащиленко В. Н., Варфоломеев С. В. Система управления электроприводами приточно-вытяжной вентиляции обогатительных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 182 – 188.

19. Кашников А. В., Левин Л. Ю. Нечеткое управление главной вентиляторной установкой и автоматическими регуляторами в системах проветривания рудников / XXII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2019). Сборник докладов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. – С. 128 – 131.

20. Izquierdo S., Izquierdo L. Mamdani fuzzy systems for modelling and simulation: A critical assessment // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2018, vol. 21, no. 3. DOI: 10.18564/jasss.3660. **PLoS**

REFERENCES

1. Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R. Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings. *Proceedings of Montreal Energy & Mines*. Montreal, Canada. 2007, pp. 255 – 263.

2. Hardcastle S., Kocsis C., Li G. Analyzing ventilation requirements and the utilization efficiency of the Kidd Creek mine ventilation system. *12th U.S.-North American Mine Ventilation Symposium*. Reno, NV, USA. 2008, pp. 27 – 36.

3. Semin M. A., Grishin E. L., Levin L. Yu., Zaitsev A. V. Automated ventilation control in mines. Challenges, state of the art, areas for improvement. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 623 – 632. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

4. Moreau K., Laamanen C., Bose R., Shang H., Scott J. A. Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021, vol. 31, no. 6, pp. 1159 – 1167. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.11.009.

5. Semin M. A., Levin L. Y., Maltsev S. V. Development of automated mine ventilation control systems for belarusian potash mines. *Archives of Mining Sciences*. 2020, vol. 65, no. 4, pp. 803 – 820. DOI: 10.24425/ams.2020.135178.

6. Acuña E., Lowndes I. A review of primary mine ventilation system optimization. *Interfaces*. 2014, vol. 44, no. 2, pp. 163 – 175. DOI: 10.1287/inte.2014.0736.

7. Chatterjee A., Zhang L., Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. *Applied Energy*. 2015, vol. 146, pp. 65 – 73. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.134.

8. Acuña E., Allen C. Ventilation control system implementation and energy consumption reduction at Totten Mine with Level 4 Tagging and future plans. *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*. Sudbury, Canada. 2017, pp. 89 – 95. DOI: 10.36487/ACG_rep/1710_06_Acuna.

9. Acuña E., Feliú A. Considering ventilation on demand for the developments of the New Level Mine Project, El Teniente. *A Deep Mining 2014: Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia. 2014, pp. 813 – 821. DOI: 10.36487/ACG_rep/1410_59_Acuna.

10. De Vilhena C. L., Margarida da Silva J. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand. *Mining Technology*. 2019, vol. 129, no. 1, pp. 1 – 8. DOI: 10.1080/25726668.2019.1651581.

11. Levin L. Y., Semin M. A. Conception of automated mine ventilation control system and its implementation on Belarussian potash mines. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. Colorado, USA. 2017, pp. 17.1 – 17.8.

12. Grishin E. L., Nakaryakov E. V., Trushkova N. A., Sanikovitch A. N. Experience in implementation of dynamic mine ventilation control. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 8, pp. 103 – 108. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15.

13. Kashnikov A. V., Levin L. Y. Applying machine learning techniques to mine ventilation control systems. *XX Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM-2017)*. *Sbornik dokladov*. T. 1 [XX International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM-2017). Collection of reports. Vol. 1], Saint-Petersburg, SPbGETU «LETI», 2017, pp. 553 – 556. [In Russ].

14. Kashnikov A. V., Kruglov Yu. V. Estimating energy consumption of mine fans in underground mines in case of uncertainty of fan influence zones. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022, no. 4, pp. 72 – 84. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI.20220408.

15. Maltsev S. V., Kazakov B. P., Semin M. A. Efficiency upgrading techniques for complex mine ventilation systems. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2019, no. 4, pp. 283 – 291. [In Russ].

16. Hameed I. A. Simplified architecture of a type-2 fuzzy controller using four embedded type-1 fuzzy controllers and its application to a greenhouse climate control system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2019, vol. 223, no. 5, pp. 619 – 631. DOI: 10.1243/09596518JSCE708.

17. Saritas I., Etik N., Allahverdi N., Sert I. Fuzzy expert system design for operating room air-condition control systems. *Expert Systems with Applications*. 2007, vol. 36, no. 6, pp. 23–30. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.02.028.

18. Fashilenko V. N., Varfolomeev S. V. Supply-extract ventilation electric drives system control in concentration mill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 2, pp. 182–188. [In Russ].

19. Kashnikov A. V., Levin L. Yu. Fan and regulators fuzzy control in mine ventilation systems. *XXII Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM-2019). Sbornik dokladov* [XXII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM-2019). Collection of reports], Saint-Petersburg, SPbGETU «LETI», 2019, pp. 128–131. [In Russ].

20. Izquierdo S., Izquierdo L. Mamdani fuzzy systems for modelling and simulation: A critical assessment. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2018, vol. 21, no. 3. DOI: 10.18564/jasss.3660.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кашников Алексей Валерьевич¹ – младший научный сотрудник,

e-mail: alexey.kashnikov@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-3872-5862,

Круглов Юрий Владиславович¹ – д-р техн. наук,

руководитель проектно-инновационного центра,

e-mail: aerolog@list.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0977-7484,

¹ Горный институт Уральского отделения РАН.

Для контактов: Кашников А.В., e-mail: alexey.kashnikov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A. V. Kashnikov¹, Junior Researcher,

e-mail: alexey.kashnikov@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-3872-5862,

Yu. V. Kruglov¹, Dr. Sci. (Eng.),

Head of Project and Innovation Center,

e-mail: aerolog@list.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0977-7484,

¹ Mining Institute of Ural Branch,

Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: A. V. Kashnikov, e-mail: alexey.kashnikov@gmail.com.

Получена редакцией 29.09.2022; получена после рецензии 06.03.2023; принята к печати 10.04.2023.

Received by the editors 29.09.2022; received after the review 06.03.2023; accepted for printing 10.04.2023.

