

## ПРИМЕНЕНИЕ СТРАТЕГИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ \*

Л.Ю. Левин, *Горный институт УрО РАН*  
А.В. Зайцев, *Горный институт УрО РАН*  
С.В. Мальцев, *Горный институт УрО РАН*  
Е.Г. Кузьминых, *Горный институт УрО РАН*

---

### Для цитирования:

Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Мальцев С.В., Кузьминых Е.Г. Применение стратегии динамического проветривания для повышения энергоэффективности систем вентиляции // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2024. – № 2. – С. 6–14.  
<https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.2.1>

---

Большинство горных предприятий ведут отработку месторождений полезных ископаемых со второй половины XX века. За это время протяженность и разветвленность рудников выросла существенным образом, суммарная протяженность горных выработок некоторых рудников достигает 400 км. В такой ситуации системы вентиляции стали невероятно сложными, включающими одновременную работу до 5 главных вентиляторных установок. Существующие системы вентиляции работают в постоянном режиме проветривания – во все рабочие зоны воздух подается по максимуму, независимо от типа работ. Кроме того, действующие методики расчета требуемого количества воздуха для проветривания рабочих зон и шахты в целом не предусматривают динамическое управление воздушными потоками в зависимости от выполняемых технологических операций. Построение автоматических систем расчета требуемого количества воздуха для проветривания шахты, а также динамическое регулирование воздушных потоков позволит оптимизировать процесс проветривания шахты в соответствии с фактически необходимой потребностью в свежем воздухе для рабочих зон и шахты в целом при выполнении соответствующих технологических операций. Реализация стратегии динамического проветривания позволит значительно повысить энергоэффективность системы вентиляции как существующего, так и проектируемого рудника. Кроме того, внедрение средств контроля параметров рудничной атмосферы позволит оперативно реагировать на превышения предельно-допустимых концентраций взрывоопасных и ядовитых газов, за счет увеличения подачи воздуха на добычной участок.

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения (рег. номер НИОКТР 124020500030-7).

Таким образом, применение стратегии динамического проветривания позволяет получить дополнительный резерв воздуха при повышении аэрологической безопасности.

**Ключевые слова:** система вентиляции, проветривание, производительность, циклограмма, динамическое проветривание, энергоэффективность.

### Введение

В последние десятилетия активно развивается горнодобывающая промышленность. Горные предприятия совместно с научными и проектными организациями тесно взаимодействуют по задачам поддержания и увеличения производственных мощностей в условиях безопасной эксплуатации месторождений.

Важность решения данных задач обусловлена поиском оптимального варианта отработки месторождений полезных ископаемых на разных стадиях развития по критериям обеспечения требований промышленной безопасности и минимизации капитальных и эксплуатационных затрат.

Одним из основных технологических процессов, влияющих на безопасную отработку, является проветривание горных выработок. При разработке вентиляционных схем существующих и проектируемых рудников решается задача определения оптимальных параметров вентиляционного оборудования [1], которая начинается с выполнения расчета требуемого количества воздуха.

Согласно действующей нормативной документации [2] методология расчета количества воздуха устроена таким образом, что расчет выполняется позабойно суммированием потребностей отдельных забоев и всех остальных потребителей с введением обоснованных коэффициентов запаса. Данный подход свидетельствует о том, что воздух должен рассчитываться и подаваться в забой по максимальному объему, независимо от выполняемых технологических операций.

Все процессы, протекающие в забоях, меняются циклично, а сами обрабатываемые забои периодически перемещают в пределах обрабатываемых горизонтов и их количество изменяется. Поэтому на

рудниках наблюдаются изменения потребности в воздухе, в зависимости от вида работ, расстановки потребителей и их количества [3].

Одними из первых исследователей в СССР, занимавшихся вопросами оптимального управления проветриванием шахт и рудников, являются И.И. Местер и С.В. Цой [4,5]. В данных трудах впервые указано, что для достижения оптимального режима проветривания необходимо в шахте определять самый трудно проветриваемый участок, и он не должен быть ограничен вентиляционными сооружениями.

Далее в работе [6] приводится структура САУП рудников, которая основана на решении задачи оптимального управления воздухораспределением.

Начиная с 2000-х годов системы автоматического управления проветриванием на уровне «ГВУ – рудник – выработки главных направлений (вблизи ствола)» начали активно внедряться в калийные рудники России и Белоруссии [7–9].

С учетом изученности вопроса разработки систем автоматического управления проветриванием остается незатронутой задача управления проветриванием на уровне рабочих зон. Первые шаги по данной проблеме представлены в работе [10]. Реализация данной стратегии требует исследования динамики газовыделения в очистных и подготовительных забоях.

В настоящее время подача воздуха в рудник регулируется с помощью преобразователя частоты главной вентиляторной установки. Выработки главных направлений регулируются автоматическими вентиляционными дверьми, которые расположены преимущественно вблизи вентиляционного ствола и регулируются створками (рис. 1).



Рис. 1. Автоматическая вентиляционная дверь в условиях рудника

Данная технология позволяет перераспределять расходы воздуха между главными направлениями, исключая избыточную подачу воздуха в рудник и неравномерность воздухораспределения.

При этом самые интересные процессы с точки зрения выделения вредностей, их распределения по сечению выработки традиционно происходят в рабочих зонах при ведении добычных работ.

### Основная часть

Существующие технологии добычи полезного ископаемого можно разделить на непрерывные и циклические. Самым ярким примером непрерывной технологии является применение комбайна в сочетании с конвейером, загрузочная станция которого перемещается следом, принимая отбитую руду, которая дальше перегружается на участковые транспортные средства.

К циклическим технологиям относятся способы разрушения массива за счет применения взрывчатого вещества. Данная технология подразумевает под собой определенный порядок ведения горных работ в рабочей зоне, которая включает следующие основные технологические операции:

- бурение шпуров;
- зарядание взрывчатого вещества;
- взрывные работы;
- проветривание после взрывных работ;

- оборка и крепление горных выработок;
- отгрузка полезного ископаемого.

Для каждой технологической операции применяется соответствующее горное оборудование и, как следствие, в пределах одной рабочей зоны потребность в необходимом количестве воздуха для каждой технологической операции различается. Для условий приведенной цикличности технологических операций в рабочей зоне выделяются следующие факторы расчета требуемого количества воздуха:

- Расчет по минимальной скорости движения воздуха в соответствии с требованиями п. 152 ФНиП [2];
- Расчет по количеству горнорабочих, находящихся в рабочей зоне;
- Расчет по выделению горючих газов из породного массива;
- Расчет по разжижению ядовитых газов, образующихся при ведении взрывных работ;
- Расчет по разжижению выхлопных газов, образующихся при работе техники с двигателями внутреннего сгорания.

В большинстве случаев определяющими расчетными факторами для рабочей зоны являются техника с двигателями внутреннего сгорания и ведение взрывных работ, при этом преимуществом обладает фактор работы техники с

ДВС [11–13]. Пример типовой циклограммы ведения горных работ в рабочей зоне представлен на рис. 2.

Анализ приведенной циклограммы ведения работ показывает, что техника с ДВС находится в пределах рабочей зоны 1,5 смены из 3. Проветривание забоя после взрывных работ при условии взрывания 1 раз в сутки составляет порядка 30% времени от 1 смены. Бурение шпуров чаще всего осуществляется с применением техники, оснащенной электродвигателем, поэтому для данной технологической операции требуемое количество воздуха определяется по выделению горючих газов из породного массива либо по минималь-

ной скорости движения воздуха в данной выработке [14–15].

В связи с этим технологические операции в рабочих зонах можно разделить на два типа: операции, при которых образуются ядовитые газы, и операции, не приводящие к поступлению ядовитых газов в рудничную атмосферу. Данный факт позволяет обеспечить ступенчатую подачу количества воздуха в рабочую зону в зависимости от типа выполняемых операций. В данном случае требуемое количество воздуха, подаваемое в рабочую зону, в сравнении с традиционным методом проветривания представлено на рис. 3. Красной линией на рис. 3 обозначены уровни

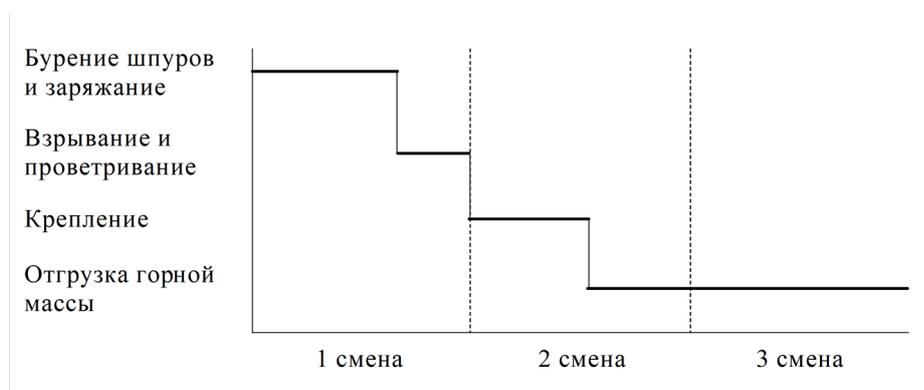


Рис. 2. Пример циклограммы ведения горных работ в рабочей зоне

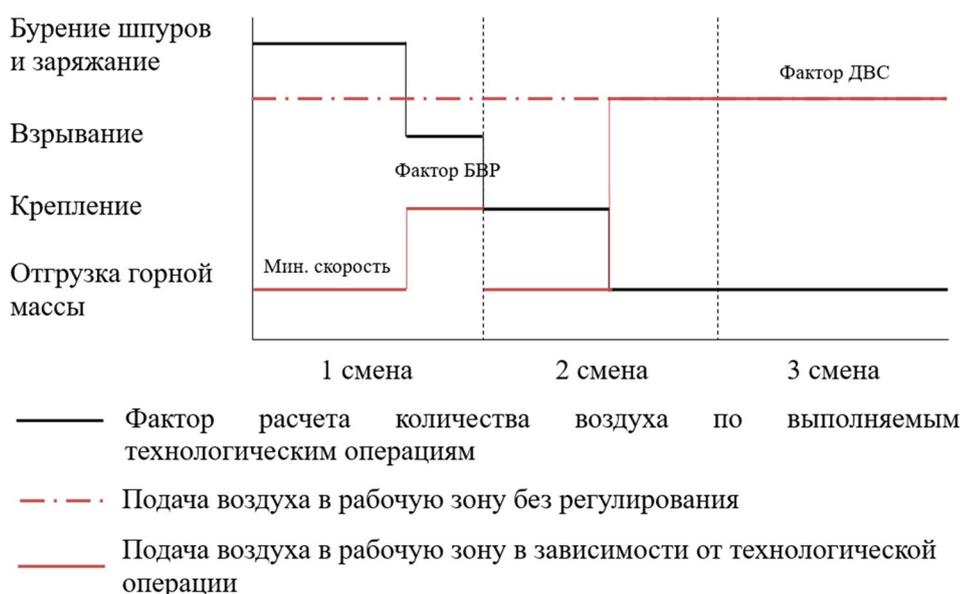


Рис. 3. Принцип подачи свежего воздуха в рабочую зону в зависимости от выполняемых технологических операций

подачи свежего воздуха по определяющему фактору для конкретной технологической операции, штрих-пунктирной линией обозначена подача свежего воздуха в рабочую зону при традиционном подходе к построению системы вентиляции рудника.

Например, традиционная позабойная методика расчета количества воздуха, при наличии трех одинаковых забоев и одной погрузо-доставочной единицы (1 самосвал и 1 погрузочная машина), требует

выполнения расчета таким образом, как будто работает три погрузо-доставочных единицы вместо одной (рис. 4).

Другими словами, данный подход можно описать следующим образом: независимо от работы техники в забое, требуется всегда подавать максимальное количество воздуха для проветривания.

На рис. 5 представлен динамический подход подачи воздуха в забои при наличии трех одинаковых забоев и одной

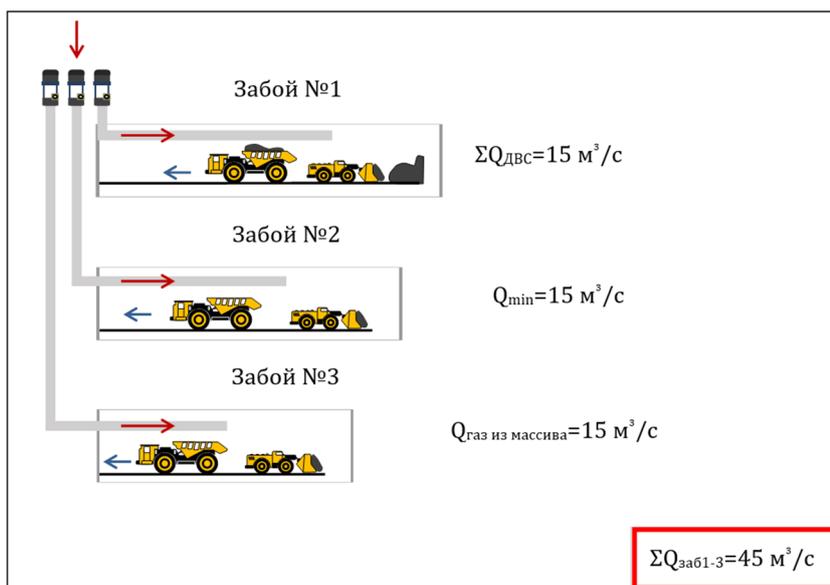


Рис. 4. Пример традиционной позабойной методики расчета количества воздуха при наличии 1 самосвала и 1 ПДМ

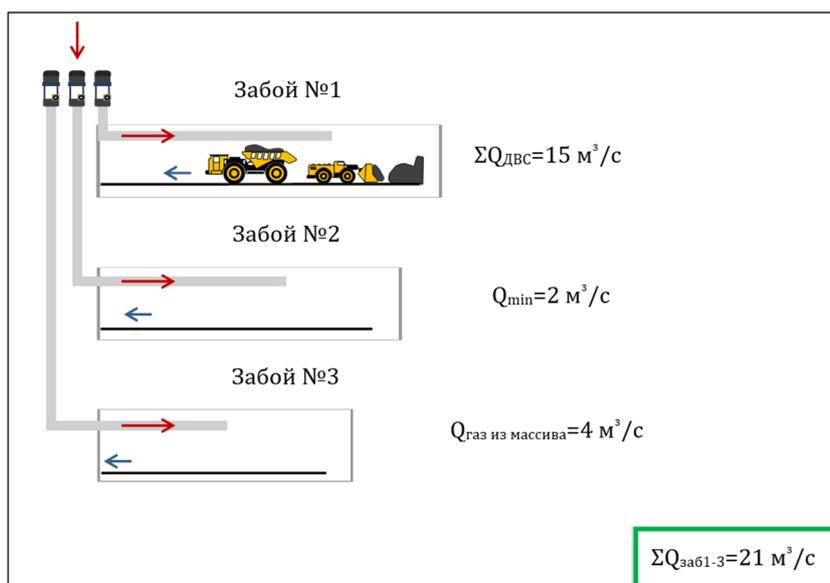


Рис. 5. Пример динамического расчета количества воздуха при наличии 1 самосвала и 1 ПДМ

погрузо-доставочной единицы (1 самосвал и 1 погрузочная машина) с учетом расчетного фактора. Объем воздуха для оставшихся двух забоев рассчитывается, исходя из определяющего фактора расчета воздуха.

Таким образом, переход к динамической стратегии расчета количества воздуха в забоях и организации их проветривания позволит влиять на потребность воздуха всего рудника. Для реализации данного подхода требуется исследование закономерностей газовыделения в забоях, научное обоснование возможности динамического расчета количества воздуха, проектирование системы динамического управления подачей воздуха и контроля состава рудничной атмосферы в горных выработках рудника, а также установка оборудования и внедрение алгоритмов принятия решений.

Простейший пример реализации схемы непрерывного контроля состава рудничной атмосферы и динамического управления потоками воздуха в условиях предполагаемого рудника представлен на рис. 6.

Работа данной системы предполагается в автоматическом режиме по показаниям датчиков контроля состава рудничного воздуха и системы позиционирования техники.

В итоге система динамического управления проветриванием в зависимости от месторасположения техники и концентрации газов автоматически определяет потребность в воздухе для горных выработок рудника.

На рис. 7 представлена структурная схема взаимодействия элементов системы.

Кроме возможности динамического управления воздухораспределением в шахтной вентиляционной сети, система динамического проветривания также имеет ряд преимуществ, по сравнению со статичными системами вентиляции:

- Повышается энергоэффективность системы вентиляции, за счет обеспечения потребителей фактически потребным количеством воздуха без перерасхода.
- Повышается аэрологическая безопасность ведения горных работ, за счет применения средств аэрогазового контро-

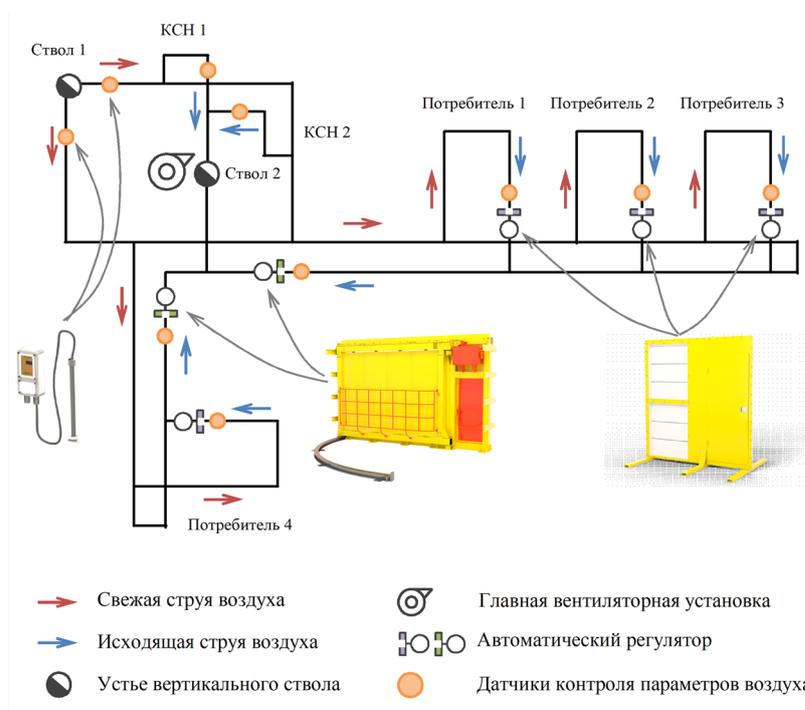


Рис. 6. Пример схемы непрерывного контроля состава рудничной атмосферы и динамического управления потоками воздуха



Рис. 7. Структурная схема взаимодействия элементов системы непрерывного контроля состава рудничной атмосферы и динамического управления потоками воздуха

ля и возможности оперативного увеличения подачи воздуха на участок ведения горных работ.

- Повышается безопасность реверсирования вентиляционной струи за счет реализации алгоритмов работы системы вентиляции в аварийных режимах, в результате чего расход воздуха в главных выработках будет не менее 60% от нормального режима проветривания.

- Присутствует возможность реализации дополнительных режимов проветривания рудника в период ремонтных смен или остановки отдельных направлений.

Выполненные исследования для действующих и проектируемых рудников показывают значительное повышение энергоэффективности системы вентиляции и уменьшение количества выработок при переходе от классической схемы проветривания к динамической системе

управления воздухом. Снижение энергозатрат на проветривание рудника при переходе на динамическую систему проветривания может достигать до 65% при сравнении с классической системой вентиляции [16].

### Выводы

Предложенный подход к реализации динамического управления воздушными потоками в сравнении с традиционными системами вентиляции горных предприятий имеет множество достоинств, таких как повышение энергоэффективности, за счет оптимизации подачи необходимого количества воздуха для каждой технологической операции, а также повышение безопасности ведения горных работ, за счет внедрения средств контроля параметров рудничной атмосферы и средств динамического управления.

### Библиографический список

1. Ушаков К. З., Бурчаков А. С., Пучков Л. А., Медведев И. И. Аэрология горных предприятий. – М.: Недра, 1987. – 420 с.
2. Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (дата обращения: 12.03.2024).

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. Местер И.И. Автоматизация контроля и регулирования рудничного проветривания / И.И. Местер, И.Н. Засухин. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
5. Цой С.В. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 335 с.
6. Пучков Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт / Л.А. Пучков, Л.А. Бахвалов. – М.: Недра, 1992. – 399 с.
7. Круглов Ю.В. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии / Ю.В. Круглов, М.А. Семин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12. – № 9. – С. 106–115.
8. Круглов Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: автореф. дис. ... доктора техн. наук. – Пермь.: Горный институт Уральского отделения РАН, 2012. – 42 с.
9. 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. – Т. 65. – № 4.
10. Бублик С.А., Зайцев А.В., Семин М.А., Мальцев С.В. Анализ эффективности систем динамического управления проветриванием на калийных рудниках // Горное эхо. – 2021. – № 3. – С. 81–89.
11. Накаряков Е.В. Натурные исследования рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания // Горное эхо. – 2021. – № 4. – С. 113–118. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.4.22>.
12. Кузьминых Е.Г., Левин Л.Ю., Мальцев С.В. Распределение продуктов выхлопных газов техники с двигателями внутреннего сгорания в шахтной вентиляционной сети // Горное эхо. – 2023. – № 2. – С. 96–103 <https://doi.org/10.7242/echo.2023.2.17>.
13. Olkhovskiy D. V., Parshakov O. S., Bublik S. A. Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting // Mining Science and Technology (Russia). – 2023. – Т. 8. – № 1. – С. 47–58 <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-86>.
14. Гришин Е.Л., Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г. Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляция в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 280–290 <https://doi.org/10.15593/2712-8008/2020.3.8>.
15. Кузьминых Е.Г., Кормициков Д.С. Анализ методов расчета требуемого количества воздуха для разжижения отработанных выхлопных газов // Горное эхо. – 2020. – № 3. – С. 107–115 <https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.21>.
16. Кузьминых Е.Г., Мальцев С.В. Обеспечение энергоэффективности системы вентиляции рудника на стадии проектирования горного предприятия // Горное эхо. – 2022. – № 3. – С. 80–87 <https://doi.org/10.7242/echo.2022.3.13>.

## APPLICATION OF DYNAMIC VENTILATION STRATEGY TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF VENTILATION SYSTEMS

Levin L.Yu., Zaitsev A.V., Maltsev S.V., Kuzminykh E.G.

*Mining Institute UB RAS*

### For citation:

Levin L.Yu., Zaitsev A.V., Maltsev S.V., Kuzminykh E.G. Application of dynamic ventilation strategy to improve energy efficiency of ventilation systems // Perm Federal Research Center Journal. – 2024. – № 2. – P. 6–14. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2024.2.1>

Most mining companies have been mining mineral deposits since the second half of the 20<sup>th</sup> century. During this time, the length and branching of mines has grown substantially, with the total length of mine workings in some mines reaching 400 km. In such a situation, ventilation systems have become incredibly complex, involving simultaneous operation of up to 5 main fan units. Existing ventilation systems operate in a constant ventilation mode, that is maximum air is supplied to all working areas,

regardless of the type of work. In addition, current methods for calculating the required amount of air for ventilation of working zones and the mine as a whole do not provide for dynamic control of air flows depending on the technological operations performed. The construction of automatic systems for calculating the required amount of air for mine ventilation, as well as dynamic control of air flows, will optimize the process of mine ventilation in accordance with the actual need for fresh air at the working areas and the mine as a whole when performing the relevant technological operations. The implementation of the dynamic ventilation strategy will significantly improve the energy efficiency of the ventilation system of both the existing and the projected mine. Moreover, the introduction of means for controlling the parameters of the mine atmosphere will make it possible to promptly respond to exceeding the maximum permissible concentrations of explosive and poisonous gases by increasing the air supply to the mining area. Thus, the application of dynamic ventilation strategy allows to obtain additional air reserve while improving aerological safety.

*Keywords: ventilation system, ventilation, performance, cyclogram, dynamic ventilation, energy efficiency.*

**Сведения об авторах**

*Левин Лев Юрьевич*, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий отделом аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: aerolog\_lev@mail.ru

*Зайцев Артем Вячеславович*, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией развития горного производства «ГИ УрО РАН»; e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru

*Мальцев Станислав Владимирович*, кандидат технических наук, заведующий сектором рудничной вентиляции отдела аэрологии и теплофизики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: st.v.maltsev@ya.ru

*Кузьминых Евгений Геннадьевич*, инженер отдела аэрологии и теплофизики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: kuzminykh.evgeniy@gmail.com

*Материал поступил в редакцию 10.06.2024 г.*