УДК 622.23.05

DOI: 10.25018/0236 1493 2023 4 0 93

# УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ КАМЕР СЛУЖЕБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Л.Ю. Левин<sup>1</sup>, А.Е. Суханов<sup>1</sup>, А.Г. Исаевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, e-mail: andy1997sae@qmail.com

Аннотация: В настоящее время одной из ключевых целей горнодобывающих предприятий становится снижение углеродного следа. Как следствие, остро встает вопрос снижения энергоемкости производственных процессов на шахтах и рудниках. Множество современных исследований в области рудничной вентиляции направлены на решение вопросов повышения энергоэффективности проветривания горных выработок. Дано описание одного из перспективных и недостаточно изученных подходов повышения энергоэффективности систем вентиляции калийных рудников, заключающегося в реализации последовательного проветривания камер служебного назначения. Предлагается система вентиляции, в которой воздушная струя после проветривания камеры служебного назначения будет использована для проветривания последующих рабочих зон, находящихся на том же направлении шахтного поля. Приведено описание натурных исследований газораспределения в условиях подземного рудника Верхнекамского месторождения калийномагниевых солей, а также результаты моделирования различных сценариев применения последовательного проветривания камер служебного назначения. Представлено научное обоснование безопасности предлагаемых технических и организационных решений на калийных рудниках. Приведены экономические показатели, доказывающие целесообразность разработанной системы проветривая камер служебного назначения. С помощью предлагаемых мероприятий возможно снижение производительности главной вентиляторной установки и снижение производительности системы воздухоподготовки.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, последовательное проветривание, углеродный след, повышение энергоэффективности вентиляции, калийные рудники, безопасность, ядовитые газы.

**Благодарность:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета № 075-03-2021-374/5 от 29 сентября 2021 г.

Для цитирования: Левин Л. Ю., Суханов А. Е., Исаевич А. Г. Увеличение энергоэффективности систем вентиляции калийных рудников путем реализации последовательного проветривания камер служебного назначения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 93–106. DOI: 10.25018/0236 1493 2023 4 0 93.

#### Enhanced energy efficiency of ventilation in potash mines by means of sequential airing of service rooms

L.Y. Levin<sup>1</sup>, A.E. Sukhanov<sup>1</sup>, A.G. Isaevich<sup>1</sup>

Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: andy1997sae@gmail.com

**Abstract:** The carbon footprint reduction is becoming a key objective in coal mining. Accordingly, it is urgent to cut down energy consumption of production processes in mines. Many a studies in the sphere of mine ventilation aim to enhance energy efficiency of mine ventilation. One of the promising though understudied approaches to ventilation energy efficiency stimulation in mines is sequential airing of service rooms. In the proposed system of ventilation, the air flow after the service room airing is used to air the sequential operating spaces in this direction of the mine field. The field studies of gas distribution in a mine at the Upper Kama deposit of potassium and magnesium salts are described, and the modeling scenarios of sequential airing of service rooms in the mine are presented. The safety of the proposed technology and arrangements is theoretically confirmed. The economic indicators to prove practicability of sequential airing of service rooms are given. The proposed approach enables burden reduction in operation of the main mine fan and air conditioning system.

*Key words:* mine ventilation, sequential airing, carbon footprint, ventilation energy efficiency enhancement, potash mines, safety, toxic gases.

*Acknowledgements:* The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the supplementary agreement to Grant Contract No. 075-03-2021-374/5 dated 29 September 2021.

*For citation:* Levin L. Y., Sukhanov A. E., Isaevich A. G. Enhanced energy efficiency of ventilation in potash mines by means of sequential airing of service rooms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(4):93-106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_4\_0\_93.

#### Введение

Множество современных исследований в области горного дела направлены на решение вопросов повышения энергоэффективности всех этапов добычи и обогащения полезных ископаемых. Особое внимание в данном вопросе уделяется процессам проветривания горных выработок [1-3]. Главные вентиляторные установки (ГВУ) подземных рудников круглосуточно потребляют значительное количество электрической энергии, что делает процесс проветривания одним из наиболее энергозатратных. Данные вентиляторы способны потреблять  $1300...2000 \text{ MBT} \cdot \text{ч}$  электроэнергии

и пропускать через себя порядка  $20\,000...$   $30\,000\, \text{м}^3$ /мин воздуха, тем самым обеспечивая свежим воздухом рабочие зоны, находящиеся на расстоянии нескольких десятков километров от воздухоподающих стволов.

Современные методы разработки месторождений полезных ископаемых характеризуются высокой скоростью подвигания рабочих забоев. Особенно явно это прослеживается на калийных рудниках. С каждым годом из недр земли извлекается все больше и больше полезных ископаемых, которые впоследствии используются в области сельского хозяйства, в оборонной промышленности,

медицине и т.д. Как следствие, с каждым годом увеличивается длина подземных выработанных пространств и рабочие зоны отдаляются от центра шахтного поля. Так, например, в настоящее время суммарная длина подземных горных выработок калийных рудников Верхнекамского месторождения может превышать 500 км.

Добыча калийной соли в РФ осуществляется механизированными добычными комплексами, производительность которых может достигать 10 т/мин. Такие высокие темпы разработки месторождения, а также рост масштабов разветвления вентиляционных сетей влекут за собой создание сложных условий для проветривания подземных горных выработок. В связи с этим актуальной является задача по разработке организационных и технических решений, направленных на снижение энергозатрат процессов проветривания горных выработок. Данная задача важна также и потому, что в настоящее время в горнодобывающей промышленности имеет место тренд по снижению углеродного следа с целью не допустить глобального роста температуры и сократить количество выбросов углекислого газа в атмосферу [4, 5].

Различные научные школы на протяжении долгих лет решают вопрос повышения энергоэффективности системы проветривания подземных рудников. Так, например, в работах [6, 7] описывается система автоматического управления проветриванием (САУП), суть которой заключается в создании динамической системы проветривания. Авторы утверждают, что доля энергозатрат на системы воздухоподготовки и на системы вентиляции может варьироваться в диапазоне 30...70%. Реализация системы автоматического управления проветриванием позволит достичь снижения приведенных значений. В исследованиях [2, 8] рассматриваются способы снижения затрат на электроэнергию при проветривании рудников сложной топологии.

Данное исследование включает в себя определения аэродинамических характеристик шахтных стволов, способы автоматизации обработки данных воздушно-депрессионных съемок, а также вопросы выбора наиболее энергоэффективного режима одновременной работы нескольких ГВУ на одну вентиляционную сеть рудника.

Особо активно изучается вопрос безопасности внедрения систем с частичным повторным использованием воздуха в калийных рудниках. Ученые Горного института УрО РАН в течение длительного времени занимаются исследованием и внедрением систем рециркуляции воздушного потока на калийные рудники. Многолетний опыт эксплуатации и изучения рециркуляционных систем показал, что данные мероприятия, направленные на увеличение энергоэффективности системы вентиляции, не только позволяют снизить количество подаваемого воздуха в рудник, но и безопасны в условиях ведения горных работ на калийных месторождениях [9, 10]. Аналогичные исследования проводятся и за рубежом [11, 12].

В работе [13] поднимается вопрос повышения энергоэффективности системы вентиляции посредством изменения конструкции лопаток рабочих колес вентиляторов главного проветривания. Автор утверждает, что увеличение КПД вентилятора на 10% путем изменения формы лопаток позволит снизить затрачиваемую электроэнергию на 10,8 МВт в год.

Исследования [14, 15] посвящены повышению энергетической эффективности ГВУ посредством внедрения автоматизации в систему управления агрегатами.

В работах обоснована многоцелевая система автоматического управления частотно-регулируемыми приводами агре-

гатов, обеспечивающая минимизацию энергетических потерь.

В зарубежных странах вопрос повышения энергоэффективности также является острым на протяжении не одного десятка лет. Еще в 1999 г. ученые из США R. Papar, A. Szady, W.D. Huffer писали в своей работе [16], что Министерство энергетики Соединенных Штатов разработало государственную программу «Motor Challenge», которая была направлена на повышение энергоэффективности промышленных систем с приводом от электрических двигателей. Одним из важнейших объектов внимания в данной программе являлись вентиляторы главного проветривания подземных рудников. Ученые приводят цифры, согласно которым ежегодное потребление электроэнергии для горнодобывающей промышленности составляло 44 млрд кВт.ч. А главные вентиляторные установки, используемые для шахтной вентиляции, уже в то время потребляли примерно 12 млрд кВт⋅ч.

Таким образом, очевидным становится факт, что вопрос увеличения энергоэффективности систем проветривания горных выработок и воздухоподготовки является актуальным и требует глубокого изучения.

В данной работе рассматривается один из способов снижения энергозатрат на работу главных вентиляторных установок, а также на работу систем воздухоподготовки. Суть предлагаемой системы вентиляции заключается в последовательном проветривании камер служебного назначения (КСН) калийных рудников.

В соответствии с п. 156 ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» от 8 декабря 2020 г. камеры служебного назначения должны проветриваться обособленной струей свежего воздуха с выбросом отработанного

воздуха непосредственно на исходящую струю участка (шахты). В работе представлены результаты экспериментальнотеоретических исследований, которые дают возможность отступать от указанного пункта ФНиП при создании безопасных условий эксплуатации системы вентиляции с последовательным проветриванием КСН.

Научное обоснование безопасности предлагаемых мероприятий основано на изучении газовой обстановки в горных выработках рудников. Основными источниками выделения ядовитых газов в КСН калийных рудников являются самоходные машины с двигателем внутреннего сгорания. Работа описывает результаты произведенных натурных исследований и их анализ на предмет наличия концентраций газовых примесей в рудничном воздухе одного из калийных рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВМКМС). По результатам замеров произведено моделирование газораспределения и рассмотрены несколько возможных сценариев последовательного проветривания. Предложены схемы для реализации предлагаемой системы вентиляции, а также технические решения, которые позволят обеспечить контроль за состоянием атмосферы рабочих зон. Итогом работы являются исходные данные для разработки системы вентиляции с последовательным проветриванием КСН, а также обоснование безопасности предлагаемых решений.

### Построение математической модели

Моделирование накопления газовых примесей в горных выработках в условиях последовательного проветривания КСН производилось на актуализированной топологии горных выработок в программе «Аэросеть». За основу была принята детализированная вентиляционная

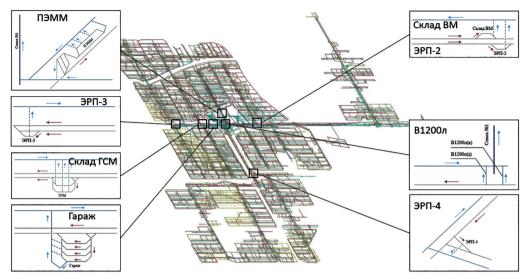


Рис. 1. Модель одного из рудников ВМКМС, построенная в программном комплексе «Аэросеть», с расположением камер служебного назначения

Fig. 1. Mine model and layout of service rooms in software Aeroset

модель одного из рудников ВМКМС. На рис. 1 представлена используемая модель.

В основе программы «Аэросеть» лежат уникальные модели, позволяющие рассчитывать аэродинамические и газодинамические процессы в шахтах и рудниках. Математическая постановка задачи распределения воздуха в модели заключается в составлении уравнений 1 и 2 законов Кирхгофа [17]. Решение полученной системы осуществляется с применением метода контурных расходов, суть которого сводится к увязке расходов во всех независимых по расходам ветвях сети. В сети выработок выделяется набор замкнутых контуров, в каждом из которых итерационно увязывается напор, создаваемый вентилятором, а также увязывается падение давления (депрессия) вследствие аэродинамического сопротивления выработок и вентиляционных сооружений. Поскольку газы переносятся движущимся воздухом, газовая обстановка в руднике определяется особенностями динамики воздушных потоков, а также количеством, местоположением и интенсивностью источников газовыделений. Данные модели и вычислительные алгоритмы опубликованы в цикле научных статей [17-19].

Расход воздуха в выработке определяет скорость распространения газов в пределах вентиляционной сети и величину объемной концентрации ядовитых газов. Скорости воздуха в горных выработках замерялись с использованием анемометров АПР 2, а сечение выработки измерялось посредством применения лазерных дальномеров. Результаты полученных расходов воздуха применялись для осуществления калибровки вентиляционной модели в программе «Аэросеть».

Объектом внимания являются следующие КСН: автогараж, подземные электромеханические мастерские, электрораспределительные подстанции, склад горюче-смазочных материалов, склад взрывчатых материалов. По результатам замеров все рассматриваемые КСН были обеспечены требуемым количеством

Результаты замеров примесей газов в исходящем воздухе из автогаража и склада ГСМ Take-off data on gas content in return air from a garage and a POL warehouse

Место замера	Зафиксированные газы			
	СО		NO <sub>x</sub>	
	процентное содержание, %	величина ПДК, %	процентное содержание, %	величина ПДК, %
Автогараж	0,0012	0,0017	0,0003	0,00026
Склад ГСМ	0,0002		0,00026	

воздуха. Замеры расходов воздуха производились непосредственно в вентиляционных скважинах КСН. Если проход к скважине был ограничен, то замер производился как можно ближе к ней. В дальнейшем полученные значения расходов вносились в модель и производилась корректировка модельного воздухораспределения.

Вторым этапом эксперимента являлось проведение газовой съемки в горных выработках рассматриваемого рудника. Объектом исследования являлись КСН, имеющие обособленное проветривание, выработки главных направлений, а также выработки околоствольного двора вблизи стволов. Отбор проб производился непосредственно в вентиляционных скважинах. В случае, если подход к скважине был невозможен, натурные исследования производились как можно ближе к скважине со стороны вентиляционных выработок. Для проведения газовой съемки были использованы следующие приборы и оборудование:

- газоанализаторы портативные Drager X-am 2500 (CH $_4$ , CO, H $_2$ S, O $_2$ );
- газоанализаторы портативные Altair (СН<sub>4</sub>, СО, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>);
  - газоопределители химические ГХ-Е;
  - аспираторы АМ-5Е.

При определении компонентного состава воздуха замеры производились по следующим ядовитым газам:  $SO_{2}$ ;  $H_{2}S$ ;  $C_{3}H_{4}O$ ;  $NH_{3}$ ;  $CnH_{2n}+2$ ; Hg,  $NO_{2}$ , CO. Все эти газы представлены в табл. № 2 п. 151 ФНиП в области промышленной безо-

пасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых».

Результаты газовоздушной съемки показали, что качественное изменение состава воздуха происходит только в тех камерах, где работают самоходные машины, оборудованные двигателем внутреннего сгорания. К таким камерам можно отнести автогараж и склад горюче-смазочных материалов (ГСМ). Как правило, фиксировались газы оксида углерода СО и окислов азота NO. Замеры производились в утреннюю смену. Специально для проведения эксперимента было заведено такое количество машин, при котором могло произойти превышение допустимых концентраций газов в вентиляционных скважинах. Превышения предельно-допустимых значений были зафиксированы в автогараже и в складе ГСМ, когда самоходное оборудование приезжало на заправку баков топливом. Результаты представлены в таблице.

По результатам проведенных замеров определения концентраций ядовитых газов в горных выработках было принято решение поделить КСН на дватипа:

1. Без изменения качественного состава воздуха — такие КСН, в которых состав воздуха не меняется. Примером таких камер являются электрораспределительные подстанции (ЭРП), приводные камеры, склады взрывчатых материалов и т.д. Авторами работы было решено отнести данные камеры к после-

довательному проветриванию без проведения дополнительного моделирования газораспределения в них, поскольку замеренные концентрации ядовитых примесей в них имели нулевые значения.

2. С изменением качественного состава воздуха - КСН, в которых происходит изменение состава воздуха за счет выхлопных газов, продуктов горения, продуктов сварки и др. К таковым были отнесены автогараж и склад ГСМ. Для последовательного проветривания данных камер авторами работы произведено дополнительное моделирование и разработаны технические, а также организационные мероприятия для недопущения возникновения аварийных ситуаций, связанных с превышением ПДК газов. Более подробная информация о моделировании и разработанных мероприятиях представлена в следующих разделах данной статьи.

## Обоснование безопасного последовательного проветривания КСН

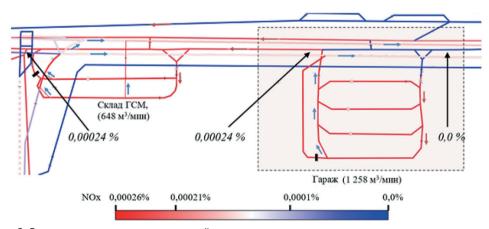
В данной работе особенностью обоснования безопасного проветривания КСН с изменением качественного состава воздуха является то, что они располагаются друг за другом по тракту движения

воздушной струи. Согласно рис. 1, воздух будет заходить в автогараж, далее будет насыщаться некоторым количеством ядовитых газов, после чего этот же воздух будет поступать в склад ГСМ, где претерпит дополнительное подмешивание ядовитых примесей. Моделирование газовой обстановки производилось только по оксидам азота  $NO_x$ , поскольку превышения концентрации были зафиксированы только по данному газу.

При моделировании было воспроизведено четыре модельных сценария. Модельные ситуации 2—4 заранее подразумевают, что КСН, в которых не происходит изменение качественного состава воздуха, проветриваются последовательно. Во всех рассмотренных вариантах источники газовыделения находятся непосредственно внутри камер служебного назначения, а их количественные параметры постоянны и равны замеренным концентрациям.

1. Фактическое воздухораспределение, когда и склад ГСМ, и автогараж проветриваются обособленно.

Данная модельная ситуация предполагает текущий способ проветривания, при котором и автогараж, и склад ГСМ проветриваются обособленно. Согласно произведенным замерам, расход возду-



Puc. 2. Распространение газовых примесей при последовательном проветривании только автогаража Fig. 2. Propagation of gas impurities in sequential airing of garage only

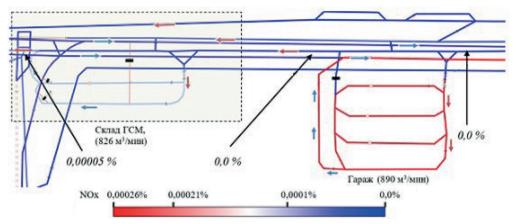


Рис. 3. Распространение газовых примесей при последовательном проветривании только склада ГСМ Fig. 3. Propagation of gas impurities in sequential airing of POL warehouse only

ха в автогараже составил 1872 м³/мин, а в складе ГСМ — 651 м³/мин. Расход воздуха на ГВУ в такой ситуации равен 29 963 м³/мин. В дальнейших модельных сценариях расчет энергоэффективности будет осуществляться от данной производительности вентилятора главного проветривания. Стоит учитывать, что в дальнейшем расчете экономических показателей все камеры, в которых не происходит загрязнение, учтены как последовательно проветриваемые.

2. К последовательному проветриванию принимается только автогараж, склад ГСМ проветривается обособленно.

На рис. 2 представлены результаты моделирования рассматриваемого сценария в программе «Аэросеть».

Производительность ГВУ при последовательном проветривании всех КСН без изменения качественного состава воздуха и автогаража составила  $26\ 110\ \text{м}^3/\text{мин}$ . Это на 13% меньше, чем при фактической системе проветривания. Концентрации  $NO_{_{\chi}}$  на главных направлениях близки к значениям ПДК = 0,00026%. Данная модельная картина получена при одновременной работе  $5\ \text{самоходных}$  машин с ДВС в автогараже.

3. К последовательному проветриванию принимается только склад ГСМ,

автогараж проветривается обособленно. Результаты моделирования сценария, при котором последовательно проветриваются все КСН, кроме автогаража, представлен на рис. 3.

В результате анализа полученных результатов численного моделирования сделан вывод, что концентрации ядовитых газов на главных направлениях находятся в пределах допустимых величин. Концентрация окислов азота на выходе из склада ГСМ составляет 0,00005%. Данная вариация компоновки КСН, которые подлежат последовательному проветриванию, позволит снизить производительность ГВУ до 26 387 м³/мин, что на 12% ниже, чем при существующей системе вентиляции.

4. Полное последовательное проветривание автогаража и склада ГСМ.

Последним рассмотренным сценарием является ситуация, при которой к последовательному проветриванию принимаются абсолютно все КСН. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Полное последовательное проветривание всех КСН характеризуется превышением предельно допустимых концентраций на выходе уже из первой камеры по тракту движения струи —

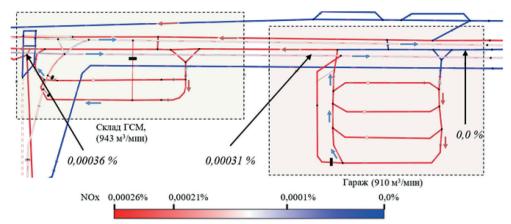


Рис. 4. Распространение газовых примесей при последовательном проветривании автогаража и склада ГСМ

Fig. 4. Propagation of gas impurities in sequential airing of garage and POL warehouse

автогаража. Это является следствием снижения количества воздуха на направлении. С точки зрения энергоэффективности, производительность ГВУ составит 24 803 м³/мин, что на 17% меньше, чем при полном обособленном проветривании всех КСН.

Возвращаясь к исходным условиям моделирования и принимая во внимание, что замеры производились при нескольких одновременно работающих машинах с ДВС, необходимо решить вопрос введения ограничения одновре-

менной работы самоходного транспорта. Авторами работы получена зависимость, позволяющая определить максимальное количество одновременно работающих машин в автогараже, с учетом того, что в складе ГСМ уже имеется один заведенный автомобиль. Результаты представлены на рис. 5.

Из графика видно, что при одной работающей машине в складе ГСМ в автогараже может находиться не более трех одновременно работающих автомобилей. Стоит принять во внимание, что

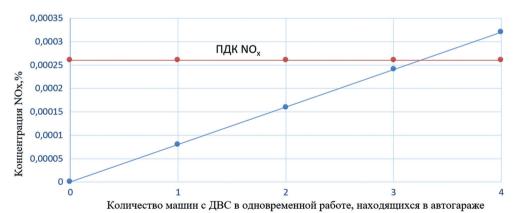


Рис. 5. Зависимость концентрации оксидов азота от количества самоходных машин с ДВС, находящихся в одновременной работе

Fig. 5. Nitrogen oxide concentrations versus number of internal combustion engine-driven machines in simultaneous operation

такое ограничение не скажется положительно на производительности горных работ. В связи с этим необходимо внедрение организационных и технических решений, позволяющих создать безопасные условия при полном последовательном проветривании всех КСН рудника. Одним из таких мероприятий является разработка алгоритма работы системы вентиляции при возникновении превышений концентраций в КСН.

## Условия безопасного применения последовательного проветривания КСН

Разработка алгоритма работы системы вентиляции при возникновении превышений концентраций в КСН подразумевает собой совокупность вентиляционных объектов, работающих в единой системе. С технической точки зрения, необходимо внедрение следующих элементов:

- главная вентиляторная установка должна быть оснащена частотным преобразователем тока для возможности плавного изменения расхода воздуха, подаваемого в рудник;
- вентиляционные скважины или подходы к ним должны быть оснащены автоматическими вентиляционными дверями для возможности изменения схемы проветривания КСН с последовательного на обособленное и наоборот;
- выработки, которые будут при последовательном проветривании участвовать в качестве вентиляционных (запасные выходы из КСН), должны быть оснащены автоматическими вентиляционными дверями для возможности изменения схемы проветривания КСН с последовательного на обособленное и наоборот;
- КСН и места их сопряжений с главными выработками должны быть оснащены системами аэрогазового кон-

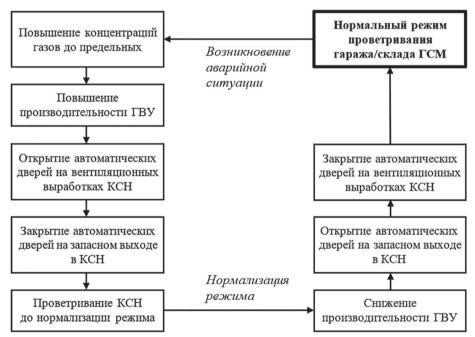


Рис. 6. Алгоритм действий при возникновении аварийного режима в КСН с изменением качественного состава воздуха

Fig. 6. Activity algorithm in case of off-normal operation at air quality change in service room

троля с возможностью передачи показаний диспетчеру рудника.

Авторами разработан алгоритм эксплуатации вентиляционной системы с последовательным проветриванием КСН при возникновении аварийной ситуации, способствующий созданию безопасных условий ведения горных работ, который представлен на рис. 6.

Стоит отметить, что решение по переводу КСН на обособленное проветривание и обратно принимает главный инженер рудника.

К организационным мероприятиям стоит отнести осуществление контроля за газовой обстановкой в КСН, оснащение водителей и мастеров средствами оперативного контроля параметров шахтной атмосферы (индивидуальными газоанализаторами), а также корректировку плана ликвидации аварий на предмет разработки реверсивных позиций на главных направлениях и в КСН.

Экономическая составляющая разработки системы вентиляции с последовательным проветриванием КСН заключается в снижении энергозатрат при работе агрегатов ГВУ. В условиях рудника, который рассматривается в данной работе, при полном последовательном проветривании всех КСН производительность вентилятора главного проветривания снизится на 5160 м<sup>3</sup>/мин, при этом затрачиваемая мощность на электродвигателях, согласно модельным расчетам, снизится на 826,5 кВт. Принимая во внимание, что режим работы ГВУ характеризуется как безостановочный, снижение затрачиваемой электроэнергии в сутки составит 19 824 кВт-ч. Вторая экономическая составляющая предлагаемых мероприятий заключается в возникновении технического резерва по внедрению дополнительных комбайновых комплексов. В результате перевода всех КСН на последовательное проветривание появляется возможность внедрения 3–4 проходческих или добычных комбайновых комплексов.

Расчет технического резерва производился из учета высвобожденного воздуха в результате перевода КСН на последовательное проветривание, а также минимального требуемого количества воздуха на один добычной забой с учетом коэффициентов запаса воздуха на всех этапах расчета. Полученные показатели подчеркивают актуальность разработки системы вентиляции с последовательным проветриванием камер служебного назначения.

#### Выводы

Повышение энергоэффективности на горнодобывающих предприятиях является одной из ключевых задач. На сегодняшний день имеется множество разных подходов к снижению энергозатрат системы вентиляции калийных рудников. Одним из таких способов является разработка системы вентиляции с последовательным проветриванием камер служебного назначения.

На примере одного из калийных рудников ВМКМС проведен ряд экспериментальных исследований, суть которых заключается в определении текущих концентраций ядовитых и взрывоопасных газов при работе оборудования в КСН. По результатам эксперимента построена математическая модель газораспределения в программе «Аэросеть» и произведено численное моделирование газораспределения в условиях последовательного проветривания КСН. Моделирование показало возможность последовательного проветривания выработок камер служебного назначения при соблюдении ряда условий, описанных в работе.

Для обеспечения безопасности предлагаемой системы проветривания разработан перечень технических и организационных мероприятий. Основной

упор сделан на постоянный контроль концентраций газов в режиме реального времени. Также предложен алгоритм действий при возникновении внештатных ситуаций в КСН, связанных с превышением ПДК ядовитых газов. Расчет энергоэффективности предлагаемой

системы показал, что посредством последовательного проветривания КСН, описанных в данном исследовании, производительность ГВУ снизится на  $5160 \, \text{м}^3$ /мин, а ежесуточная экономия затрачиваемой электроэнергии составит порядка  $19.824 \, \text{кBT} \cdot \text{ч}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Казаков Б. П.* Разработка энергосберегающих технологий добычи полезных ископаемых на основе комплексного использования способов утилизации рудничного метана // Стратегия и процессы освоения георесурсов. 2017. Т. 15. С. 263 267.
- 2. *Казаков Б. П., Мальцев С. В., Семин М. А.* Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников сложной топологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № S5-1. С. 51 58.
- 3. *Шалимов А. В.* Исследование влияния эжекторных установок на воздухораспределение в рудничных вентиляционных сетях произвольной топологии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: ГИ УрО РАН, 2003.
- 4. Banasiewicz A., Wroblewski A., Gola S. Preliminary sources identification of nitric oxide (NO) emissions in underground mine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 942, no. 1, article 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012019.
- 5. Pan Y., Tukkaraja P., Sridharan S. J. Investigation of gas and airflow distribution in a block cave mine // Mining, Metallurgy & Exploration. 2022, vol. 39, no. 5, pp. 1 12. DOI: 10.1007/s42461-022-00605-0.
- 6. 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.
- 7. 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.
- 8. 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.  $\mathbb{N}^2$  4. С. 283 291.
- 9. *Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Шалимов А. В.* Повышение эффективности ресурсос-берегающих систем вентиляции для подземных рудников // Горный журнал. -2014. № 5. С. 26-28.
- 10. *Казаков Б. П., Исаевич А. Г., Шалимов А. В.* Проветривание калийных рудников с частичным повторным использованием воздуха // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2007. № 4. С. 47 52.
- 11. Hall A. E., McHaina D. M., Hardcastle S. Controlled recirculation in Canadian underground potash mines // Mining Science and Technology. 1990, vol. 10, no. 3, pp. 305 314. DOI: 10.1016/0167-9031(90)90504-L.
- 12. Pritchard C., Scott D., Frey G. Case study of controlled recirculation at a Wyoming trona mine // Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 2013, vol. 334, no. 1, pp. 444 448.
- 13. Маликов Е. А. Энергоэффективность вентиляции в шахтах // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. С. 4115 4120.

- 14. *Кузьмин И. К.* Энергосберегающий синхронный электропривод шахтной вентиляторной установки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ (ТУ), 2007. 18 с.
- 15. *Шонин О. Б.*, *Пронько В. С.* Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом // Материаловедение. Энергетика. 2014. № 2(195). С. 49 57.
- 16. Papar R., Szady A., Huffer W., Vern M., Mckane A. Increasing energy efficiency of mine ventilation systems / Proceeding of the 8th US mine ventilation symposium. 1999, pp. 611 617.
- 17. Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Шалимов А. В., Зайцев А. В., Семин М. А. Методы математического моделирования рудничных аэрологических процессов и их численная реализация в аналитическом комплексе «Аэросеть»: Монография. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021.-375 с.
- 18. Kormshchikov D. S., Grishin E. L. Analysis of mine-ventilation networks using the aeroset software / 20th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings. 2020, vol. 20, pp. 17 26. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.003.
- 19. Красноштейн А. Е., Файнбург Г. З. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников. Екатеринбург: УрО РАН, 1992. 242 с. 🖂

#### REFERENCES

- 1. Kazakov B. P. Development of energy-saving technologies for mining based on the integrated use of methods of utilization of mine methane. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesur-sov.* 2017, vol. 15, pp. 263 267. [In Russ].
- 2. Kazakov B. P., Maltsev S. V., Semin M. A. Development of ventilation efficiency upgrading techniques for complex mine airway networks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S5-1, pp. 51 58. [In Russ].
- 3. Shalimov A. V. *Issledovanie vliyaniya ezhektornykh ustanovok na vozdukhoraspredelenie v rudnichnykh ventilyatsionnykh setyakh proizvol'noy topologii* [Investigation of the effect of ejector installations on air distribution in mine ventilation networks of arbitrary topology], Candidate's thesis, Perm, GI UrO RAN, 2003.
- 4. Banasiewicz A., Wroblewski A., Gola S. Preliminary sources identification of nitric oxide (NO) emissions in underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 942, no. 1, article 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012019.
- 5. Pan Y., Tukkaraja P., Sridharan S. J. Investigation of gas and airflow distribution in a block cave mine. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022, vol. 39, no. 5, pp. 1-12. DOI: 10.1007/s42461-022-00605-0.
- 6. Semin M. A., Grishin E. L., Levin L. Y., 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.
- 7. 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.
- 8. Maltsev S. V., Kazakov B. P., Semin M., A. Efficiency upgrading techniques complex mine ventilation systems. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2019, no. 4, pp. 283 291. [In Russ].
- 9. Kazakov B. P., Levin L. Y., Shalimov A. V. Improving the efficiency of resource-saving ventilation systems of underground mines. *Gornyi Zhurnal*, 2014, no. 5, pp. 26 28. [In Russ].
- 10. Kazakov B. P., Isaevich A. G., Shalimov A. V. Ventilation of potash mines with partial reuse of air. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal.* 2007, no. 4, pp. 47 52. [In Russ].
- 11. Hall A. E., McHaina D. M., Hardcastle S. Controlled recirculation in Canadian underground potash mines. *Mining Science and Technology*. 1990, vol. 10, no. 3, pp. 305 314. DOI: 10.1016/0167-9031(90)90504-L.

- 12. Pritchard C., Scott D., Frey G. Case study of controlled recirculation at a Wyoming trona mine. *Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.* 2013, vol. 334, no. 1, pp. 444 448.
- 13. Malikov E. A. Energy efficiency of ventilation in mines. *Mezhdunarodnaya nauchnotekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova* [International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V. G. Shukhov], 2021, pp. 4115 4120. [In Russ].
- 14. Kuz'min I. K. Energosberegayushchiy sinkhronnyy elektroprivod shakhtnoy ventilyatornoy ustanovki [Energy-saving synchronous electric drive of the shaft ventilator unit], Candidate's thesis, Moscow, MEI (TU), 2007, 18 p.
- 15. Shonin O. B., Pronko V. S. Energy efficiency improvement of mine main fan installations by means of the multipurpose control system for vfd. *Materialovedenie*. *Energetika*. 2014, no. 2(195), pp. 49 57. [In Russ].
- 16. Papar R., Szady A., Huffer W., Vern M., Mckane A. Increasing energy efficiency of mine ventilation systems. Proceeding of the 8th US mine ventilation symposium. 1999, pp. 611 617.
- 17. Kazakov B. P., Levin L. Yu., Shalimov A. V., Zaytsev A. V., Semin M. A. *Metody matematicheskogo modelirovaniya rudnichnykh aerologicheskikh protsessov i ikh chislennaya realizatsiya v analiticheskom komplekse «Aeroset'»*: Monografiya [Methods of mathematical modeling of mine aerological processes and their numerical implementation in the analytical complex «Aeroset»: Monograph], Perm, Izd-vo PNIPU, 2021, 375 p.
- 18. Kormshchikov D. S., Grishin E. L. Analysis of mine-ventilation networks using the aeroset software. *20th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings*. 2020, vol. 20, pp. 17 26. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.003.
- 19. Krasnoshteyn A. E., Faynburg G. Z. *Diffuzionno-setevye metody rascheta provetrivaniya shakht i rudnikov* [Diffusion-network methods of calculation of ventilation of mines and mines], Ekaterinburg, UrO RAN, 1992, 242 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Левин Лев Юрьевич $^1$  — член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора ГИ УрО РАН, заведующий отделом, Суханов Андрей Евгеньевич $^1$  — младший научный сотрудник, e-mail: andy1997sae@gmail.com, Исаевич Алексей Геннадьевич $^1$  — канд. техн. наук, зав. сектором,

<sup>1</sup> Горный институт Уральского отделения РАН.

Для контактов: Суханов A.E., e-mail: andy1997sae@gmail.com.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.Y. Levin¹, Corresponding Member of Russian
Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Deputy Director of Mining Institute, Head of Department,
A.E. Sukhanov¹, Junior Researcher,
e-mail: andy1997sae@gmail.com,
A.G. Isaevich¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector,
¹ Mining Institute of Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

**Corresponding author**: A.E. Sukhanov, e-mail: andy1997sae@gmail.com.

Получена редакцией 10.08.2022; получена после рецензии 15.02.2023; принята к печати 10.03.2023. Received by the editors 10.08.2022; received after the review 15.02.2023; accepted for printing 10.03.2023.