УДК 622.4

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ РУДНИКОВ

Е. Л. ГРИШИН, научный сотрудник, канд. техн. наук, aeroevg@mail.ru

Е. В. НАКАРЯКОВ, младший научный сотрудник

Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

Н. А. ТРУШКОВА, инженер, Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

А. Н. САНИКОВИЧ, ведущий инженер, ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Беларусь

Рассмотрен уникальный на постсоветском пространстве опыт ОАО «Беларуськалий» по внедрению современных автоматизированных систем управления проветриванием рудников, что позволило обеспечить высокий уровень промышленной безопасности и снизить энергозатраты.

Ключевые слова: *автоматическое управление проветриванием, энергоэффективность, расчет количества воздуха, мониторинг рудничной атмосферы, вентиляция по требованию, автоматическая вентиляционная дверь, математическое моделирование, имитационная модель вентиляционной сети, повторное использование воздуха, рециркуляция, АэроСеть.*

DOI: *10.17580/gzh.2018.08.15*

Введение

В рамках технологического пути развития современная мировая экономика характеризуется повышенным спросом на полезные ископаемые. В результате существенно увеличиваются объемы добычи и производственные мощности отдельных шахт и рудников. На фоне снижения количества легкодоступных полезных ископаемых в мире происходит рост размеров сетей горных выработок рудников, переход к освоению глубоких горизонтов. Это приводит к повышению потребности рудников в свежем воздухе. При этом доставка воздуха к удаленным рабочим зонам усложняется.

Проведенные в Канаде исследования показывают, что в результате указанных процессов энергопотребление в горнодобывающем секторе растет сильнее, чем в других отраслях промышленности [1]. Мировой опыт подтверждает, что в результате усложнения систем вентиляции рудников расходы электроэнергии на проветривание составляют до 50 % энергопотребления рудника [2], а доля затрат на вентиляцию в эксплуатационных расходах рудника может достигать 40 % [3].

Повышение себестоимости полезных ископаемых вследствие указанных процессов не способствует росту инвестиций в сферу безопасности горных работ: современные системы рудничной вентиляции, основанные на автоматизации и мониторинге процессов проветривания, не получают широкого распространения из-за необходимости значительных капитальных затрат на их развертывание. Фактически, обеспечение требуемого уровня безопасности горных работ и поддержание должного состояния систем вентиляции является необходимой, но неэффективной с позиции экономики статьей себестоимости полезного ископаемого, и недропользователи стремятся удовлетворить лишь базовые потребности проветривания как элемента безопасности горных работ, закрепленные законодательством.

На фоне указанных тенденций ОАО «Беларуськалий» обладает передовым опытом повышения уровня промышленной безопасности за счет внедрения современных автоматизированных систем вентиляции рудников при одновременном снижении эксплуатационных затрат.

Автоматизация проветривания горных выработок на рудниках ОАО «Беларуськалий»

С вводом Директивы № 3 Правительства РБ «О снижении энергоемкости валового внутреннего продукта к уровню 2005 г.» в ОАО «Беларуськалий» начата реализация программы поэтапного снижения энергозатрат на проветривание рудников. Одним из мероприятий программы является внедрение элементов автоматизации проветривания.

Автоматизация систем вентиляции включает:

- средства управления перераспределением воздуха, такие как автоматические вентиляционные двери (АВД), система управления главной вентиляторной установкой (ГВУ), системы повторного использования воздуха на базе шахтных вентиляторных рециркуляционных установок (ШВУ) [4];
- средства измерения параметров рудничной атмосферы, представленные датчиками скорости воздушного потока и датчиками концентрации газов в рудничной атмосфере;
- средства связи и управления на базе микропроцессорных контроллеров и промышленных сетей.

В качестве этапов реализации программы снижения энергопотребления разработаны и внедрены следующие мероприятия по управлению системами проветривания рудников:

- сокращение внутрирудничных утечек воздуха; развертывание системы датчиков скорости воздуха позволило вести монито-

ринг системы вентиляции в режиме реального времени, что позитивно сказалось на устранении утечек;

- последовательное проветривание общешахтных камер служебного назначения с последующей подачей воздуха на главные направления; данное мероприятие стало возможно в результате мониторинга качественного состава рудничной атмосферы, показавшего, что фактический коэффициент использования воздуха ниже единицы: концентрации вредных и опасных примесей в исходящих струях воздуха существенно ниже предельно допустимых концентраций (ПДК);
- исключение коэффициента запаса воздуха в местах установки вентиляторов местного проветривания (ВМП); это мероприятие обосновано данными мониторинга и анализа качественного состава воздуха в тупиковых рабочих зонах;
- внедрение систем частичного повторного использования воздуха на базе вентиляторов ШВУ – контролируемого рециркуляционного проветривания.

Эти мероприятия позволили уменьшить энергозатраты на систему вентиляции за счет снижения подачи воздуха в рудник и его обогрева в холодный период года главной калориферной установкой (ГКУ), что совместно с другими мероприятиями по энергосбережению привело к снижению себестоимости руды на 28 %.

Вместе в тем следует учитывать, что перечисленные выше мероприятия относятся к статическим методам управления системами вентиляции, так как внедрение данных систем однократно на продолжительный период снижает потребляемую электрическую мощность ГВУ и ГКУ. Применение статических методов управления базируется на традиционном принципе расчета потребного расхода воздуха для проветривания рудника: расход воздуха определяется на долгосрочный период времени по наибольшей его потребности. Сама потребность отдельных рабочих зон и рудника в целом в рассматриваемый период времени считается неизменной.

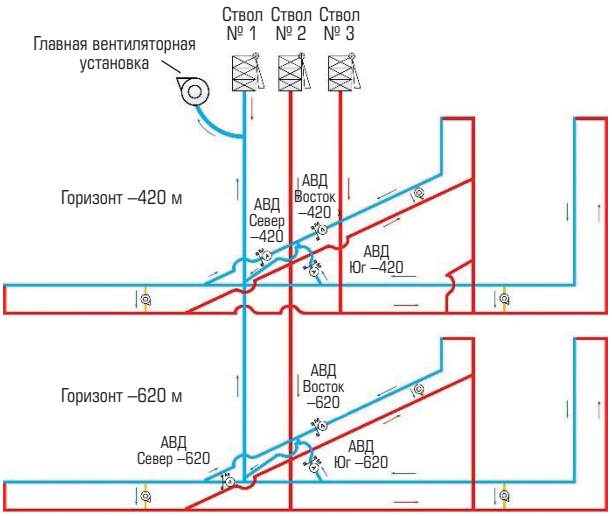


Рис. 1. Схема САУП рудника Третьего РУ

Однако в действительности потребности рабочих зон в свежем воздухе не являются неизменными, наоборот, они постоянно меняются во времени. Причинами таких изменений являются динамические процессы в вентиляционной сети, подтвержденные системами мониторинга параметров рудничной атмосферы, цикличный характер и продвижение фронта ведения горных работ.

Изменяющаяся потребность рабочих зон, потребителей и рудника в целом в требуемом расходе свежего воздуха позволила перейти от статических методов управления проветриванием к динамическим методам. Последние предполагают подачу воздуха к потребителям и в рудник в зависимости от текущей потребности в свежем воздухе. Именно динамическое управление проветриванием путем объединения всех элементов мониторинга, регуляторов воздушных потоков, коммуникаций получило название «Система автоматического управления проветриванием» (САУП) [5–10]. На Западе такая система называется по-другому: «Вентиляция по требованию» (VoD – ventilation on demand) [11, 12]. В данной статье под термином САУП понимается конкретная система управления, разработанная в Горном институте УрО РАН и реализованная на рудниках ОАО «Беларуськалий» при непосредственном участии специалистов предприятия [13].

Первым проектом внедрения САУП в ОАО «Беларуськалий» стал рудник Третьего рудоуправления. Установленные регуляторы воздушных потоков АВД и системы частичного повторного использования воздуха на базе ШВУ (**рис. 1**) в рамках проекта объединены общим алгоритмом управления с ГВУ.

Основой алгоритма стала разработка режимов проветривания и независимое управление проветриванием каждого из 6 главных направлений рудника. В соответствии с графиком работ, для каждого направления выделены несколько режимов, однозначно определяющих потребность в свежем воздухе.

Добычные работы (добыча) – данный режим предполагает ведение работ по добыче руды; условием реализации режима является работа магистральных конвейеров на направлении. Режим проветривания определяется работой добычного оборудования на направлении, где установлена АВД. Расчет количества воздуха для рабочих зон ведется с учетом работы добычного оборудования.

Ремонтные работы (ремонт) – этот режим предполагает отсутствие ведения работ по добыче руды, условием реализации данного режима является отключение магистральных конвейеров на направлении. Режим проветривания применяется при остановке добычи во всех рабочих зонах направления, где установлена АВД. Количество воздуха рассчитывается для отдельных рабочих зон с учетом отсутствия ведения горных работ (отсутствует выделение тепла и пыли).

Режим останова задействуется при остановке горных и ремонтных работ на направлении, выводе всех рабочих из выработок направления. Режим проветривания предполагает продолжительное отсутствие любых видов работ на направлении, где установлена АВД. Расчет количества воздуха ведут по фактору минимальной скорости движения воздуха в главных выработках направлений и панелей.

Аварийный режим вводится при возникновении аварийной ситуации, предусмотренной в плане ликвидации аварий. Режим может содержать несколько подрежимов проветривания, основным из которых является реверс ГВУ.

В режимах «добыча», «ремонт» система управления имеет 3 подрежима работы: ШВУ включено; ШВУ отключено; отказ датчика расхода воздуха в рециркуляционном контуре. Первые два подрежима отличаются наличием или отсутствием частичного повторного использования воздуха на направлении, где установлена АВД. Это может быть вызвано как схемой компоновки или режимом работы САУП, так и выходом из строя оборудования. Подрежим отказа датчика расхода воздуха в рециркуляционном контуре предполагает, что частичное повторное использование воздуха происходит, однако меняется схема расчета требуемого количества воздуха: вместо задания требуемого коэффициента рециркуляции используется задание производительности для рециркуляционной установки.

Величина расхода воздуха для всех направлений рудника в каждом из режимов проветривания рассчитывается отдельно и вводится специалистами рудника в систему в виде таблицы уставок для элементов управления. Производительность ГВУ автоматически регулируется при смене комбинации режимов путем изменения частоты вращения рабочего колеса вентилятора. Расчет требуемой частоты вращения выполняется специально разработанным алгоритмом управления на базе микропроцессорных контроллеров, позволяющим минимизировать потребляемую ГВУ электрическую мощность [14].

Важной составляющей алгоритма управления САУП является определение самого труднопроветриваемого направления [15]. Такое направление характеризуется наибольшими затратами электроэнергии по доставке требуемого количества воздуха, и, следовательно, АВД на таком направлении должна быть полностью открыта. Проведенные исследования позволили сделать заключение, что в условиях вентиляционной сети рудника Третьего РУ при наличии одной ГВУ самое труднопроветриваемое направление однозначно определяется по максимальной потребности в свежем воздухе (уставке по расходу).

Внедрение динамических методов управления проветриванием на руднике Третьего РУ позволило снизить величину среднего удельного расхода электроэнергии ГВУ с 1,212 до 0,73 кВт·ч/т добытой руды. Дополнительным фактором, позволяющим повысить энергоэффективность при внедрении САУП, стал факт снижения коэффициентов запаса воздуха на неравномерность его распределения в рудничной вентиляционной сети. На основании исследований неравномерность воздухораспределения при управлении потребностями в воздухе на уровне направлений рудника снизилась с 18 до 7 %, что также позволило сократить подачу воздуха за счет ГВУ.

В настоящее время заканчивается внедрение САУП на руднике Первого рудоуправления. Принцип управления и алгоритмы САУП на этом руднике идентичны проекту, реализованному на руднике Третьего РУ. Следующий, реализуемый в настоящее время проект САУП на базе рудника Четвертого рудоуправления имеет специфические особенности, связанные с разветвленной и протяженной вентиляционной сетью, наличием большого количества элементов управления, среди которых несколько ГВУ.

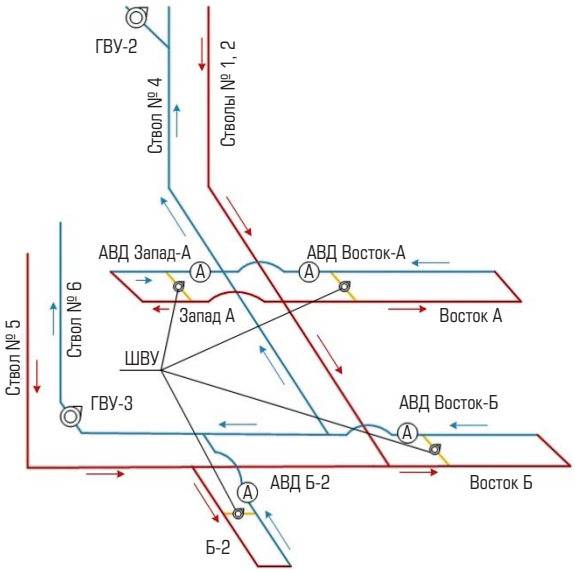


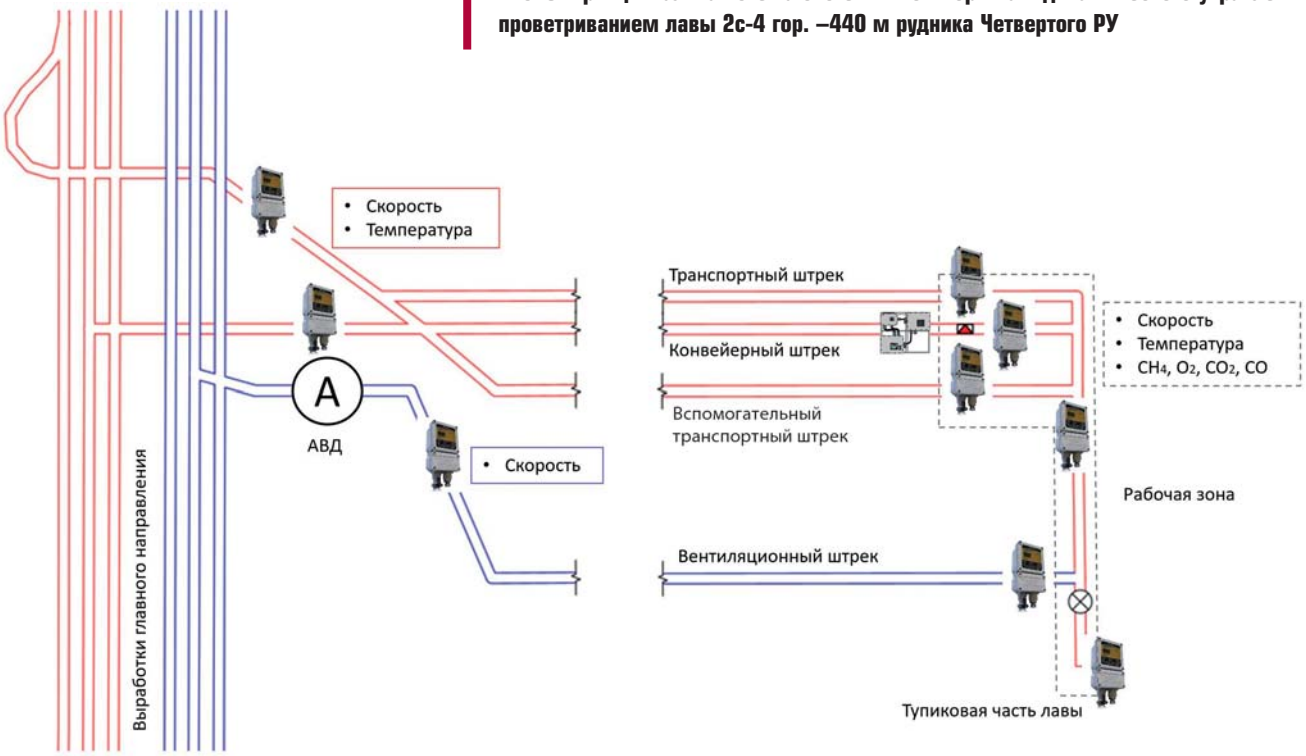
Рис. 2. Схема САУП горизонта –670 м рудника 4 РУ

Схема вентиляции рудника Четвертого РУ характеризуется независимым проветриванием двух добычных горизонтов. Реализация САУП гор. –440 м является довольно стандартной при наличии опыта САУП Третьего РУ. Горизонт –670 м обладает уникальной особенностью в виде проветривания двумя ГВУ, расположенными в разных частях шахтного поля. Исследования позволили установить, что обе ГВУ в той или иной степени влияют на обеспечение воздухом каждого из четырех независимых направлений горизонта, оборудованных АВД и ШВУ (**рис. 2**). В сложившихся условиях алгоритм, разработанный для условий рудника Третьего РУ, когда 6 параллельно подключенных направлений обеспечиваются воздухом за счет одной ГВУ, не работает. Для условий рудника разработан новый, адаптированный алгоритм.

Это сделано на основе натурных экспериментов и имитационного моделирования влияния отдельных ГВУ на проветривание направлений при различной комбинации режимов проветривания направлений. Данный подход известен в литературе как матрицы взаимовлияния [9, 16, 17]. На основании экспериментов получена матрица влияния работы ГВУ на проветривание потребителей. Она представляет собой набор коэффициентов, зависящих от уставок АВД и ШВУ, используемых для расчета приращения расхода воздуха на каждом из ГВУ для обеспечения минимального энергопотребления при достатке свежего воздуха для потребителей [18].

Еще одним новшеством разработанного для условий рудника Четвертого РУ алгоритма управления стал расчет самого труднопроветриваемого направления. Дело в том, что при наличии неочевидных взаимосвязей между ГВУ и направлениями при некоторых комбинациях режимов проветривания направление с максимальной потребностью в свежем воздухе не является самым

Рис. 3. Принципиальная схема системы мониторинга и динамического управления проветриванием лавы 2с-4 гор. –440 м рудника Четвертого РУ



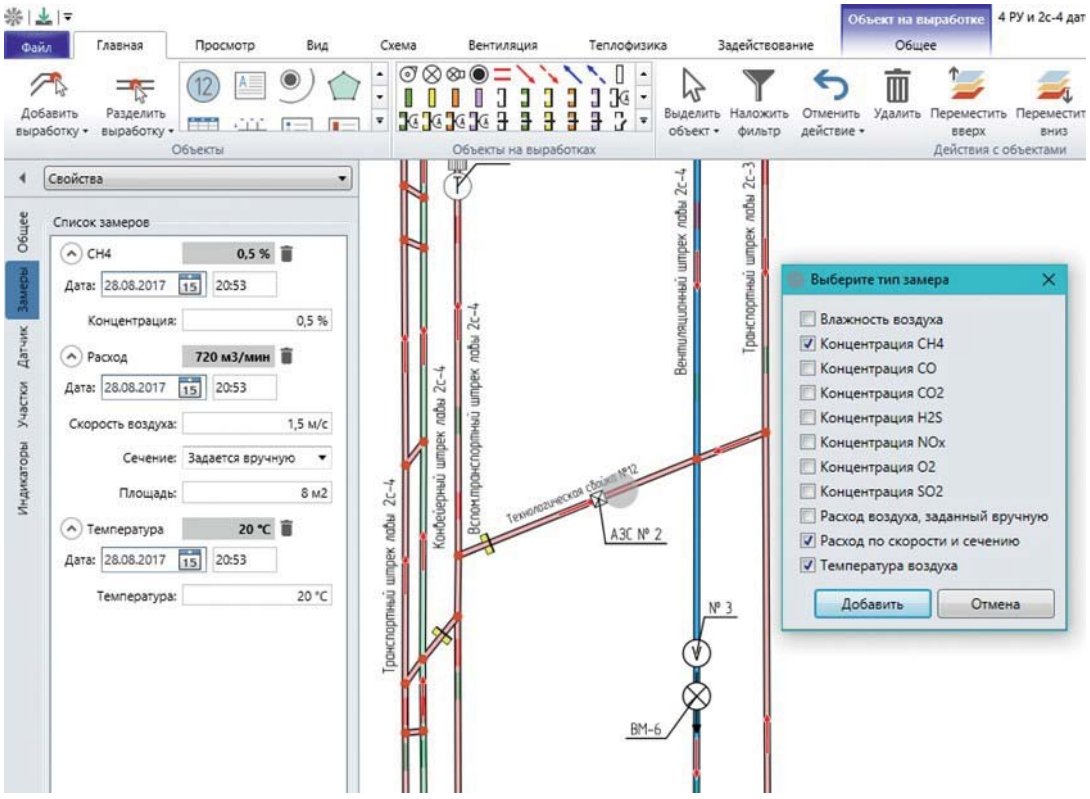


Рис. 4. Имитационная модель лавы 2с-4 как ядро системы мониторинга и динамического управления проветриванием

труднопроветриваемым, как это происходит в условиях рудника Третьего РУ. Расчет самого труднопроветриваемого направления проводится также на основе матриц влияния. Основным признаком самого труднопроветриваемого направления является полностью открытая АВД.

Использование матриц влияния в алгоритмах управления обладает одним существенным недостатком: необходимостью корректировки матрицы при любом существенном изменении вентиляционной сети. Западные исследователи в таких ситуациях предлагают использовать для промежуточных расчетов имитационное моделирование стационарного воздухораспределения, с последующей передачей рассчитанных параметров в систему управления САУП [11]. Анализ показывает, что данный подход, хорошо зарекомендовавший себя в условиях металлических рудников с малыми темпами проходческих и добычных работ, не подходит для условий калийных рудников, где вентиляционные сети постоянно изменяются. Говоря попросту, в данном случае потребуются серьезнейшие трудозатраты на постоянную корректировку модели вентиляционной сети для обеспечения приемлемой точности расчетов. Данный подход следует считать перспективным в случае разработки средств автоматической корректировки моделей вентиляционных сетей на основе данных непрерывного мониторинга [19]. Еще одним вариантом решения данной проблемы может быть использование самообучающихся алгоритмов на основе нейронных сетей и нечеткой логики [20, 21].

Однако в рамках проведенных исследований выбран другой путь решения проблемы матриц влияния. Суть данного решения заключается в повышении глубины динамического регулирования САУП. При этом средства регулирования потоками воздуха переносятся с таких крупных участков вентиляционной сети, как направления рудника (включающих до нескольких десятков рабочих зон) в глубь рудника, ближе к конечным потребителям. В этом случае средства мониторинга и динамического управления перемещаются в границах рудного поля непосредственно к рабочей зоне: для реализации функции управления уже не требуется таких трудозатрат, связанных с корректировкой вентиляционных моделей. Данный способ динамического управления в настоящий момент проходит промышленные испытания в пределах лавы 2с-4 гор. –440 м рудника Четвертого РУ.

Принципиальная схема столба лавы 2с-4 с размещением оборудования мониторинга и динамического управления представлена на **рис. 3**. Идея управления заключается в регулировании АВД в режиме реального времени на основе значений качественных и количественных характеристик рудничной атмосферы в рабочих зонах столба лавы. Роль расчетного ядра для определения управляющих воздействий на регулятор выполняет имитационная модель столба лавы, выполненная в программном комплексе «АэроСеть» [22, 23], которая собирает информацию напрямую с датчиков системы мониторинга (**рис. 4**).

Достигнутые успехи в реализации систем динамического проветривания на рудниках ОАО «Беларуськалий» позволяют предприятию продолжать движение в выбранном направлении совершенствования САУП.

Начатые во втором десятилетии XXI в. работы по внедрению систем автоматического управления проветриванием на рудниках ОАО «Беларуськалий» соответствуют, а в некоторых аспектах и опережают современные мировые тенденции в области автоматизации и промышленной безопасности подземных рудников. Результаты внедрения этих систем иллюстрируют изменение удельного показателя энергоэффективности (кВ·ч/т) по всем действующим рудникам ОАО «Беларуськалий»:

2006 г.	*2010 г.*	*2015 г.*	*2016 г.*	*2017 г.*
4,01	*3,53*	*1,31*	*1,13*	*1,1*

Заключение

ОАО «Беларуськалий» занимает лидирующие позиции в динамике повышения энергоэффективности производства, достигнутые во многом за счет внедрения динамического управления проветриванием рудников.

Библиографический список

1. *Hardcastle S. G., Kocsis C. K.* The Ventilation Challenge – A Canadian Perspective on Maintaining a Good Working Environment in Deep Mines // Challenges in Deep and High Stress Mining. Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2007. P. 4–9.
2. *Hardcastle S., Kocsis C., Li G., Hortin K.* Analysing Ventilation Requirements and The Utilization Efficiency of The Kidd Creek Mine Ventilation System // Proceedings 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium. – Reno, 2008. P. 27–36.
3. *Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R.* Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings // Proceedings of Montreal Energy and Mines. – Montreal, 2007. P. 255–263.
4. *Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Шалимов А. В.* Повышение эффективности ресурсосберегающих систем вентиляции для подземных рудников // Горный журнал. 2014. № 5. С. 26–28.
5. *Круглов Ю. В., Левин Л. Ю., Киряков А. С., Бутаков С. В., Шагбутдинов Р. И.* Применение системы автоматического оптимального управления проветриванием в Березовском руднике ОАО «Беларуськалий» // Горный журнал. 2013. № 6. С. 61–64.
6. *Карпов С. Н., Шойхет Л. А.* Основные принципы построения систем автоматического управления проветриванием шахт и рудников // Автоматизация шахт и рудников : сб. ст. – Киев : Техника, 1966. С. 17–25.
7. *Пучков Л. А., Бахвалов Л. А.* Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. – М. : Недра, 1992. – 399 р.
8. *Puchkov L. A., Temkin I. O.* Mining Ventilation: Expert System Based operative control // Proceedings of 23rd APCOM Symposium. – Tucson, 1992. P. 927–939.
9. *Абрамов Ф. А., Тян Р. Б., Потемкин В. Я.* Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников. – М. : Недра, 1978. – 231 с.
10. *Kachurin N. M., Vorobev S. A., Levin A. D., Botov F. M.* Theoretical substantiation and practical results of underground workings ventilation simulation // Eurasian Mining. 2015. No. 2. P. 35–39. DOI: 10.17580/em.2015.02.09
11. *Allen C., Keen B.* Ventilation On Demand (VOD) Project – Vale Inco Ltd. Coleman Mine // Proceedings 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium. – Reno, 2008. P. 45–50.
12. *Brake D. J.* Fire Modelling in Underground Mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. Australian Mine Ventilation Conference. – Adelaide, 2013. – 342 p.
13. *Levin L.Yu., 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, 2017. P. 17.1–17.8

14. *Круглов Ю. В., Семин М. А.* Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии // Вестник ПНИПУ. Геология. нефтегазовое и горное дело. 2013. Т. 12. № 9. С. 106–115.
15. *Гришин Е. Л., Трушкова Н. А.* Выбор параметров работы вспомогательных вентиляторов и мест их расположения в руднике для обеспечения свежим воздухом трудно проветриваемых зон // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 8. С. 304–307.
16. *Местер И. М.* Расчет вентиляции шахт на персональных компьютерах методом самонастраиваемых обратных операторов // Известия вузов. Горный журнал. 1989. № 3. С. 56–62.
17. *Тян Р. Б., Потемкин В. Я.* Управление проветриванием шахт. – Киев. : Наукова Думка, 1977. – 204 с.
18. *Казаков Б. П., Мальцев С. В., Семин М. А.* Способ оптимизации параметров работы нескольких главных вентиляторных установок для проектирования энергоэффективных режимов проветривания рудников сложной топологии // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 1. С. 101–108.
19. *Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В., Семин М.А.* Автоматизированная обработка данных воздушно-депрессионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 1. С. 22–30.
20. *Kashnikov A., Levin L.* Applying Machine Learning Techniques to Mine Ventilation Control Systems // Proceedings of the 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – St. Petersburg, 2017. P. 391–393.
21. *Темкин И. О., До Чи Тхань, Агабубаев А.* Нейросетевые модели управления процессами в вентиляционных системах шахт // Шаг в будущее: Искусственный интеллект и цифровая экономика : матер. I Междунар. науч.-практ. конф. – М. : Изд-во Государственного университета управления, 2017. С. 253–259.
22. Документация / АэроСеть. URL: http://aeroset.net/downloads/docs (дата обращения: 21.04.2018).
23. *Протасеня И. В., Береснев С. П., Круглов Ю. В., Гришин Е. Л., Киряков А. С.* Единая информационно-аналитическая система «АэроСеть» для проектирования и расчета вентиляции калийных рудников // Горный журнал. 2010. № 8 . С. 69–72. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 8, pp. 103–108
DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15

Experience in implementation of dynamic mine ventilation control

Information about authors
E. L. Grishin[1], Researcher, Candidate of Engineering Sciences, aeroevg@mail.ru
E. V. Nakaryakov[1], Junior Researcher
N. A. Trushkova[1], Engineer
A. N. Sannikovich[2], Leading Engineer
[1] Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
[2] Belaruskali, Soligorsk, Belarus

Abstract
The international mining experience shows that increasing difficulty of extraction of mineral resources leads to their cost supplement. In this case, the methods to ensure occupational safety become more sophisticated. In particular, it is concerned with the required air supply in compliance with safety standards.
The required level of occupational safety using modern automated control and monitoring systems supposes additional costs of implementation and operation.
This article describes the unique experience of Belaruskali company in implementing modern automated mine ventilation system, providing new high level of occupational safety at the concurrent reduction in power consumption of ventilation.
The scientific research into ventilation processes, introduction of method for dynamic ventilation control based on fresh air requirements in ventilation net sections per shift using automatic regulators, controlled recirculation and unique control algorithms has enabled reduction in energy consumption of mine ventilation systems by 50% of the initial level.
At the present time, research and improvement of the dynamic mine ventilation control at Belaruskali company are in progress through testing of the control system of air supply directly to work areas based on real-time monitoring of mine air parameters and prediction of air quality and quantity variation through simulations of mine ventilation operation.

Keywords: automated ventilation control, energy efficiency, required air flow rate calculation, mine air monitoring, ventilation on demand, automated ventilation door, mathematical modeling, simulation ventilation network model, air reuse, controlled recirculation, AeroSet.

References

1. Hardcastle S. G., Kocsis C. K. The Ventilation Challenge – A Canadian Perspective on Maintaining a Good Working Environment in Deep Mines. *Challenges in Deep and High Stress Mining.* Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2007. pp. 4–9.
2. Hardcastle S., Kocsis C., Li G., Hortin K. Analysing Ventilation Requirements and The Utilization Efficiency of The Kidd Creek Mine Ventilation System. *Proceedings 12th U.S. North American Mine Ventilation Symposium.* Reno, 2008. pp. 27–36.
3. Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R. Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings. *Proceedings of Montreal Energy and Mines.* Montreal, 2007. pp. 255–263.
4. Kazakov B. P., Levin L. Yu., Shalimov A. V. Increasing of efficiency of resource-saving ventilation systems for underground mines. *Gornyi Zhurnal.* 2014. No. 5. pp. 26–28.
5. Kruglov Yu. V., Levin L. Yu., Kiryakov A. S., Butakov S. V., Shagbutdinov R. I. Usage of the system for automatic optimal control of ventilation at Berezovskiy mine of Belaruskali. *Gornyi Zhurnal.* 2013. No. 6. pp. 61–64.
6. Karpov S. N., Shoikhet L. A. Automated mine ventilation control generation philosophy. *Mine Automation : collection of papers.* Kiev : Tekhnika, 1966. pp. 17–25.
7. Puchkov L. A., Bakhvalov L. A. Methods and Algorithms of Automated Ventilation Control in Coal Mines. Moscow : Nedra, 1992. 399 p.
8. Puchkov L. A., Temkin I. O. Mining Ventilation: Expert System Based operative control. *Proceedings of 23rd APCOM Symposium.* Tucson, 1992. pp. 927–939.
9. Abramov F. A., Tyan R. B., Potemkin V. Ya. Mine Ventilation Design. Moscow : Nedra, 1978. 231 p.
10. Kachurin N. M., Vorobev S. A., Levin A. D., Botov F. M. Theoretical substantiation and practical results of underground workings ventilation simulation. *Eurasian Mining.* 2015. No. 2. P. 35–39. DOI: 10.17580/em.2015.02.09
11. Allen C., Keen B. Ventilation on Demand (VOD) Project – Vale Inco Ltd. Coleman Mine. *Proceedings 12th U.S. North American Mine Ventilation Symposium.* Reno, 2008. pp. 45–50.
12. Brake D. J. Fire Modelling in Underground Mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. *Australian Mine Ventilation Conference.* Adelaide, 2013. pp. 265–276.
13. Levin L.Yu., Semin M. A. Conception of automated mine ventilation control system and its implementation on Belarusian potash mines. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium.* Colorado, 2017. pp. 17.1–17.8.
14. Kruglov Yu. V., Semin M. A. Improving the algoritm of effective air management in ventilation systems of complex topology. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo.* 2013. Vol. 12, No. 9. pp. 106–115.
15. Grishin E.L., Trushkova N.A. Determination of auxiliary fan system parameters and its location in mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten.* 2013. No. 8. pp. 304–307.
16. Mester I. M. Mine ventilation design using personal computers and method of self-adjusting inverse operators. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal.* 1989. No. 3. pp. 56–62.
17. Tyan R. B., Potemkin V. Ya. Mine Ventilation Control. Kiev : Naukova Dumka, 1977. 204 p.
18. Kazakov B.P., Maltsev S.V., Semin M. A. Working parameters optimization technique for several main ventilation installations to design energy-efficient modes of mines of complex topology aeration. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal.* 2017. No. 1. pp. 101–108.
19. Kazakov B. P., Isaevich A. G., Maltsev S. V., Semin M. A. Air distribution and depression survey automated data processing in order to build correct mathematical model of mine ventilation network. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal.* 2016. No. 1. pp. 22–30.
20. Kashnikov A., Levin L. Applying Machine Learning Techniques to Mine Ventilation Control Systems. Proceedings of the 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Petersburg, 2017. pp. 391–393.
21. Temkin I. O., Do Chi Than, Agabubaev A. Neural network models of control of ventilation systems in mines. *Step into the Future – Artificial Intelligence and Digital Economy: Proceedings of I International Scientific–Practical Conference.* Moscow : GUI, 2017. pp. 253–259.
22. AerSet. Available at: http://aeroset.net/downloads/docs (accessed: 21.04.2018).
23. Protasenya I. V., Beresnev S. P., Kruglov Y. V., Grishin Y. L., Kiryakov A. S. Unified information and analytical system "AeroNet" for designing and calculating the potash mines ventilation. *Gornyi Zhurnal.* 2010. No. 8. P. 69–72.