

ловой сбойки выбрана схема проветривания трех рабочих зон комбайновых комплексов двумя параллельно установленными вентиляторными установками ARP-800 через вентиляционный трубопровод. В работе определено направление влияния естественной тяги. После проходки межстволовой сбойки для проветривания необходимо использовать вентилятор TLT TAF 38.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № 0422-2019-0145-С-01.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опубл. 20.02.2015. – 1 с.
2. Кобылкин С.С., Кобылкин А.С. Влияние естественной тяги на безопасность ведения горных работ // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: II конф. Междунар. науч. шк. акад. К.Н. Трубецкого. – М., 2016. – С. 423-426.
3. Правила по обеспечению промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь: утв. 30.08.2012, № 45. В ред. Постановлений МЧС от 10.04.2014 № 10, от 19.11.2014 № 34, от 23.03.2017 № 7. – Текст электронный. – URL: <https://gospromnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/940/13.-pravila-po-obespecheniyu-promyshlennoy-bezopasnosti-pri-razrabotke-podzemnym-sposobom-solyanykh-mestorozhdeniy-respubliki-belarus.pdf>. (Дата обращения 29.03.2021).
4. СП 131.13330.2018. Строительная климатология: утв. 28.11.2018, введены в действие с 29.05.2019 г. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/554402860>. (Дата обращения 29.03.2021).

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2021.1.24

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Д.А. Поспелов, А.В. Зайцев, М.А. Семин  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Для условий вентиляционной сети одного из калийных рудников, расположенного на территории РФ, рассмотрена возможность модификации алгоритма автоматизированного управления проветриванием, ранее хорошо показавшего себя для единственной вентиляторной установки и параллельных соединений автоматических вентиляционных дверей. Модификация заключается в корректировке действующего алгоритма с учетом установки на выемочных единицах (панелях) окон вентиляционных регулирующих, позволяющих осуществлять более глубокое динамическое регулирование потоками воздуха. Данное решение позволит достичь оптимальных условий режима вентиляции рудника по критериям энергоэффективности и безопасности.

**Ключевые слова:** вентиляция по требованию, рудничная вентиляция, оптимальное управление, система автоматизированного управления проветриванием.

### Введение

Внедрение и разработка систем управления вентиляцией на рудниках прежде всего подразумевает определение оптимального режима вентиляции рудника, к обеспечению которого будет стремиться рассматриваемая система управления [1]. Под оптимальным

режимом вентиляции, как правило, понимается такой режим, при котором выполняются условия:

– минимизация суммарной мощности, потребляемой всеми вентиляторными установками вентиляционной сети шахты или рудника:

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{H_i Q_i}{\eta_i} \rightarrow \min ; \quad (1)$$

– обеспеченность всех рабочих зон требуемым количеством воздуха:

$$Q_j \geq Q_j^*, \quad j = 1, \dots, m, \quad (2)$$

где: индекс  $i$  нумерует вентиляторные установки; индекс  $j$  нумерует рабочие зоны;  $n$  – количество вентиляторов;  $m$  – количество рабочих зон;  $Q$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – депрессия вентиляторной установки;  $\eta$  – коэффициент полезного действия вентиляторной установки;  $Q^*$  – расход воздуха в рабочей зоне, требуемый для разбавления вредных примесей и обеспечения комфортного микроклимата, м<sup>3</sup>/с.

Оптимизационными параметрами выступают аэродинамические сопротивления горных выработок и депрессии вентиляторов [2]. Изменение депрессий вентиляторных установок происходит, как правило, за счет изменения частот оборотов рабочих колес, углов поворота лопаток рабочих колес или направляющих аппаратов, а изменение аэродинамического сопротивления горных выработок – за счет изменения параметров вентиляционных сооружений, находящихся в них [3, 4].

Таким образом, для обеспечения требуемым количеством воздуха всех потребителей с одной стороны необходимо увеличить расходы воздуха в вентиляционной сети, что приведет к увеличению общих затрат на электроэнергию, а с другой стороны необходимо максимально возможно снизить это энергопотребление [5-8]. Наилучшим решением данных задач является оптимальное перераспределение воздушных потоков, однако в условиях динамически постоянно изменяющихся вентиляционных сетей рудников это возможно лишь с использованием средств автоматического управления проветриванием.

Существуют множество примеров практического внедрения систем автоматизированного управления проветриванием (в дальнейшем САУП) на шахтах и рудниках России и стран СНГ [9-11] на основе алгоритмов поиска оптимального режима проветривания посредством управления параметрами отрицательных и положительных регуляторов [12]. Аналогом за рубежом является вентиляция «по требованию (Ventilation on demand) [7,13]. Например, в работе [9] описан опыт по внедрению автоматизированных систем управления проветриванием на калийных рудниках компании ОАО «Беларуськалий (рудники 3-РУ и 4-РУ). В работах [14, 15] описывался алгоритм автоматизированного управления проветриванием рудников для единственной главной вентиляторной установки (ГВУ). Алгоритм наиболее хорошо работает для случая единственной вентиляторной установки и параллельных соединений автоматических вентиляционных дверей (АВД), однако его обобщения на случай множества главных вентиляторных установок и последовательного размещения АВД имеют некоторые ограничения.

В основе алгоритма управления, предложенного в [14, 15], лежит набор общих правил, которые формулируются для положительных и отрицательных регуляторов.

Правила управления каждой АВД:

1. АВД будет открываться тогда, когда либо в ней самой, либо хотя бы в одной из связанных с ней последовательных АВД имеется недостаточный расход;
2. АВД будет закрываться, если хотя бы в одной, связанной с ней, параллельной АВД, будет недостаточный расход.

3. Если все АД, последовательные данной АД, имеют избыточный расход, и при этом в данной АД тоже имеет место избыточный расход, то следует закрывать данную АД.

Правила управления ГВУ:

1. Если есть рабочие зоны, в которых расход меньше декларируемого, то ГВУ увеличивает частоту вращения;
2. Если все АД закрыты, то ГВУ уменьшает частоту вращения до тех пор, пока хотя бы одна АД не будет полностью открыта;
3. Если во всех рабочих зонах есть избыточный расход, то ГВУ уменьшает частоту оборотов.

Данные правила работают для случая с установкой отрицательных регуляторов (АД) на направлениях рудника.

В настоящей работе предложена модификация набора общих правил и вытекающих из него управляющих уравнений для ГВУ и АД. Модификация разрабатывается для вентиляционной сети одного из калийных рудников с последовательно установленными отрицательными регуляторами воздуха – автоматическими вентиляционными дверями и окнами, регулирующими (ОВР), как показано на рис. 1.

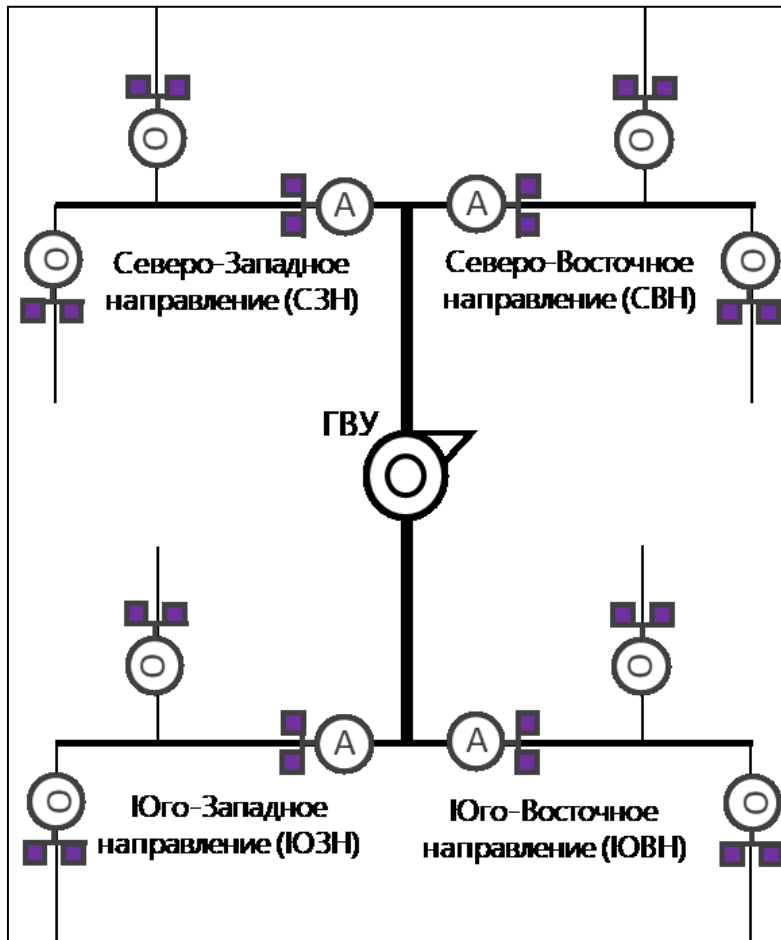


Рис. 1. Расстановка регуляторов на одном из калийных рудников

В результате такой расстановки отрицательных регуляторов в оптимальном режиме проветривания будет открыто не менее 2 регуляторов (а при некоторых условиях – 5), поскольку воздух, двигаясь от самого труднопроветриваемого места, неминуемо пройдет через два регулятора, которые должны быть полностью открыты. Это противоречит

сформулированному выше правилу 2 управления ГВУ: в оптимальном режиме проветривания, к которому стремится САУП, есть единственная открытая АВД, установленная на самом труднопроветриваемом направлении. В результате представленный выше набор правил и вытекающие из него управления в данном случае работать не будут, т.е. алгоритм, описанный в [14, 15] окажется недостаточно эффективен.

При разработке алгоритма управления для единственного положительного регулятора (ГВУ) и последовательно связанных отрицательных регуляторов (АВД и ОВР) удобно отталкиваться от алгоритма [14, 15], хорошо работающего в случае параллельного соединения отрицательных регуляторов. В данной ситуации роль каждого элемента управления четко ясна: ГВУ обеспечивает суммарный требуемый расход воздуха в шахту, а АВД перераспределяют его между собой, причем каждая АВД берет ровно столько воздуха, сколько ей требуется согласно уставке.

В рамках настоящего исследования предложена корректировка алгоритма работы САУП. В нашем случае имеется система управления с последовательно соединенными элементами АВД и ОВР, которая подразумевает декомпозицию системы управления вентиляцией на два уровня (рис. 2). На верхнем уровне останутся ГВУ, обеспечивающая суммарный требуемый расход воздуха в шахту, и АВД, перераспределяющие его между направлениями. Это первая подсистема обшей САУП. На нижнем уровне окажутся АВД, обеспечивающие суммарный требуемый расход воздуха на свои направления и ОВР, перераспределяющие его между выемочными единицами – панелями – на рассматриваемом направлении. Поскольку в условиях рудника имеется 4 направления, на каждом из которых есть АВД, то и подсистем управления на нижнем уровне будет также 4. Итого 5 подсистем САУП (или 5 п-САУП), на каждой из которых имеет место параллельное соединение регуляторов, распределяющих расход воздуха между отдельными ветвями (направлениями или панелями – в зависимости от уровня). Это позволяет использовать сформулированный набор правил для управления элементами каждой подсистемы вентиляции с некоторыми оговорками.

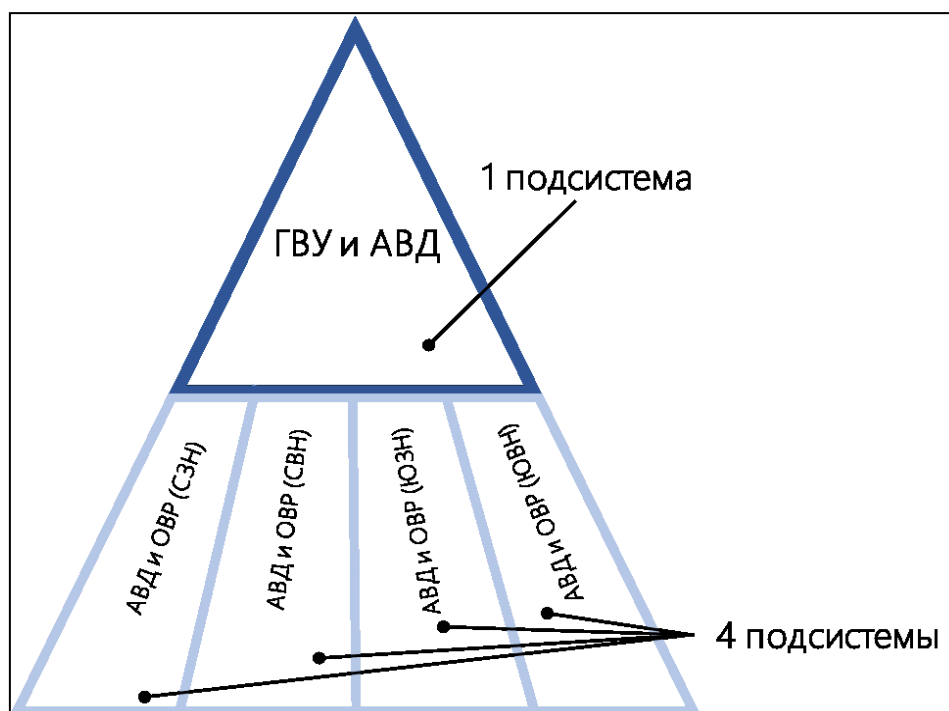


Рис. 2. Декомпозиция на уровни алгоритма САУП

В условиях рассматриваемого рудника выделим и дадим названия следующим элементам системы управления. Элемент, обеспечивающий суммарный требуемый расход воздуха на свою подсистему, будет называться элементом-питателем, а элемент системы управления, участвующий в перераспределении воздуха между отдельными ветвями подсистемы – элементом-распределителем. Таким образом, справедливо, что:

- ГВУ – всегда элемент-питатель.
- ОВР – всегда элемент-распределитель.
- АД – может выполнять обе роли, т.е. на нижнем уровне управления играет ту же самую роль, что ГВУ на верхнем.

Тогда набор правил управления в новой терминологии будет выглядеть следующим образом.

Правила управления элемента-распределителя:

1. Элемент будет уменьшать свое сопротивление (открываться) тогда, когда фактический расход воздуха через него ниже требуемого.
2. Элемент будет увеличивать свое сопротивление (закрывается), когда фактический расход воздуха через него выше требуемого.

Правила управления элемента-питателя:

1. Если в подсистеме есть рабочие зоны, в которых расход воздуха меньше требуемого, то элемент-питатель увеличивает расход (увеличение частоты вращения, уменьшение сопротивления).
2. Если во всех рабочих зонах подсистемы есть избыточный расход воздуха, то элемент-питатель должен снижать суммарный расход через подсистему (снижение частоты оборотов, увеличение сопротивления).
3. Если все элементы-распределители в подсистеме имеют ненулевое сопротивление, то элемент-питатель должен снижать суммарный расход воздуха через подсистему (снижение частоты оборотов, увеличение сопротивления).

Если записать указанные 5 правил в форме математических уравнений, получим:

$$\frac{dr_{\Pi}}{dt} = -A \max(Q_i^* - Q_i)^- + A \min(Q_i - Q_i^*)^+ + B \min_i r_{pi}, \quad (3)$$

$$\frac{dr_{pi}}{dt} = c(Q_i - Q_i^*), \quad (4)$$

где:  $r_{\Pi}$  и  $r_{pi}$  – соответственно регулируемые параметры питателя ( $\Pi$ ) и распределителя ( $p$ ) №  $i$  в рассматриваемой подсистеме САУП;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , – параметры управления, величина которых выбирается эмпирически.

При рассмотрении подсистемы САУП верхнего уровня в качестве  $r_{\Pi}$  выступает частота оборотов ГВУ, взятая со знаком минус, а в качестве  $r_{pi}$  – угол прикрытия АД (по нулевому  $r_{pi}$  считается, что АД полностью открыта). При рассмотрении подсистемы САУП нижнего уровня в качестве  $r_{\Pi}$  выступает угол прикрытия АД, а в качестве  $r_{pi}$  – угол прикрытия ОВР (по нулевому  $r_{pi}$  считается, что ОВР полностью открыта).

Модифицированный алгоритм позволит получить единственное и оптимальное решение, поскольку труднопроветриваемые АД и ОВР направления и панели соответственно открываются полностью, а также АД на каждом из легкопроветриваемых

направлений будут прикрываться до тех пор, пока одно из ОВР труднопроветриваемой панели каждого из этих направлений не окажется полностью открытым. Таким образом, максимальное количество открытых отрицательных регуляторов будет равно количеству подсистем САУП – т. е. пяти. Данные наработки использованы при разработке системы вентиляции по требованию для условий ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат».

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № 0422-2019-0145-С-01.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Пучков Л.А., Бахвалов Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. – М.: Недра, 1992. – 399 с.: ил.
3. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция: [Учебник для горных вузов]. – М.; Л.: Углетехиздат, 1949. – 444 с.: ил.
4. Местер И.И., Засухин И.Н. Автоматизация контроля и регулирования рудничного проветривания. – М.: Недра, 1974. – 239 с.: ил.
5. Старков Л.И., Земсков А.Н., Кондрашев П.И. Развитие механизированной разработки калийных руд. – Пермь; Соликамск, 2007. – 522 с.
6. De Vilhena Costa L., Margarida da Silva J. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand // Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and metallurgy. – 2020. – V. 129, № 1. – P. 1-8.
7. Hardcastle S.G., Gangal M.K., Leung E. Green and economic mine ventilation with an integrated air management system // Mine Planning and equipment selection 1998: Proceedings of the 7th International Symposium. – Balkema, Rotterdam, 1998. – P. 785-794.
8. Wallace K., Prosser B., Stinnette J.D. The practice of mine ventilation engineering. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – V. 25, № 2. – P. 165-169.
9. Гришин Е.Л., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Санникович А.Н. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников // Горн. журн. – 2018. – № 8. – С. 103-108. – DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15.
10. Levin L.Yu., Semin M. A. Conception of automated mine ventilation control system and its implementation on Belarussian potash mines // Proceedings of the 16<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium. – Colorado, 2017. – P. 17.1–17.8.
11. Kashnikov A., Levin L. Applying machine learning techniques to mine ventilation control systems. // Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). May 24-26, 2017. – Saint Petersburg, 2017. – P. 391-393. – DOI: 10.1109/SCM.2017.7970595.
12. Круглов Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем управления проветриванием подземных рудников: дис. ... д.т.н.: 25.00.20 / Круглов Юрий Владиславович. – Пермь, 2012. – 340 с.
13. Hardcastle S.G., Gangal M.K., Schreer P., Gauthier P. Ventilation-on-demand – quantity or Quality – A pilot trial at Barrick Gold's Bousquet mine // Proceedings 8th American Mine Ventilation Symposium, 11-17 June, 1999. – Rolla, Missouri, USA, 1999. – P. 31-38.
14. Круглов Ю.В., Семин М.А. Круглов Ю.В. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12, № 9. – С. 106-115.
15. Круглов Ю.В. Математическое моделирование работы оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников / Круглов Ю.В., Семин М.А., Зайцев А.В. // Изв. ТулГУ. Науки и Земле. – 2011. – № 2. – С. 116-126.