

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исходные данные на проектирование 2 РУ. Развитие главных направлений горизонта – 450 м Краснослободского рудника. Разработать исходные данные для проекта вскрытия запасов западной площади шахтного поля Краснослободского рудника с пересечением Краснослободского разлома горными выработками: Отчет договор № 87-10, этап 10 / ОАО «БелГОРХИМПРОМ»; Рук. А.А. Крукович, Н.А. Зольников. – Минск, 2014. – 218 с.
2. Барбиков Д.В., Андрейко С.С., Иванов О.В., Бобров Д.А. Оценка газодинамических характеристик горных пород Краснослободского разлома // Горн. журн. – 2018. – № 8. – С. 38-42. – DOI: 10.17580/gzh.2018.08.04.
3. Андрейко С.С., Бобров Д.А., Нестеров Е.А., Лукьянец Е.В. Оценка газоносности и газодинамических характеристик пород соляных и глинисто-карбонатных пачек на шахтном поле рудника второго рудоуправления ОАО «Беларуськалий» // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 270-279. – DOI: [10.15593/2712-8008/2020.3.7](https://doi.org/10.15593/2712-8008/2020.3.7).
4. Андрейко С.С., Калугин П.А., Щерба В.Я. Газодинамические явления в калийных рудниках: Генезис, прогноз и управление / под. ред. В.Я. Прушака. – Минск: Выш. шк., 2000. – 335 с.: ил.
5. Андрейко С.С. Механизм образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 196 с.
6. Андрейко С.С., Лялина Т.А., Нестеров Е.А., Еловицова А.С. Оценка возможности развития газодинамических явлений при ведении горных работ на III калийном горизонте Краснослободского рудника 2 РУ // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 5-15.
7. Береснев С.П., Сенюк В.В., Гончар В.И., Андрейко С.С., Литвиновская Н.А. Исследование механизма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.31-33.
8. Андрейко С.С. Современное состояние проблемы газодинамических явлений на действующих и вводимых в эксплуатацию калийных рудниках // Горное эхо. – 2019. – № 2 (75). – С. 82-89. – DOI: 10.7242/echo.2019.2.20.
9. Земсков А.Н., Кондрашев П.И., Травникова Л.Г. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. – Пермь: Тип. Купца Тарасова, 2008. – 412 с.: ил., табл.

УДК 622.45

DOI:10.7242/echo.2021.3.15

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ

С.А. Бублик, А.В. Зайцев, С.В. Мальцев, М.А. Семин  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Исследуется эффективность работы систем динамического управления проветриванием на калийном руднике Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Рассмотрены три возможных уровня реализации управления проветриванием (по степени глубины проветривания). Показано, что на сегодняшний день с учетом принятых нормативных документов на рудниках Верхнекамского месторождения целесообразно внедрение только наиболее глубокого (третьего) уровня управления проветриванием, учитывающего перераспределение потоков между блоками панелей. Проведено моделирование принципиально возможной экономии электроэнергии при внедрении на одном из рудников месторождения системы динамического управления проветриванием.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, автоматизированное управление проветриванием, энергоэффективность, вентиляция «по требованию».

### Введение

Основная задача любой системы подземной вентиляции – обеспечение всех рабочих зон (или потребителей) воздухом в достаточном количестве и качестве, чтобы разбавить загрязняющие вещества до безопасных концентраций [1, 2]. Помимо обеспечения

необходимым количеством воздуха всех рабочих зон, к системам вентиляции шахт и рудников все чаще предъявляется требование минимизации суммарного потребления электроэнергии (принцип энергоэффективности) [3, 4]. Различные оценки показывают, что на системы вентиляции и воздухоподготовки шахт и рудников приходится от 30% до 70% затрат электроэнергии [5-8].

Указанные две задачи систем вентиляции находятся в противоборстве друг с другом: решение задачи по обеспечению воздухом всех рабочих зон направлено на увеличение расхода воздуха в вентиляционной сети, а решение задачи энергоэффективности – на максимально возможное снижение расхода воздуха. Оптимальное решение задач по критериям разбавления загрязняющих веществ и энергоэффективности возможно только за счет внедрения средств автоматизированного управления проветриванием.

В настоящее время на шахтах и рудниках в России и мире все чаще внедряются системы управления проветриванием. Наиболее известными концепциями управления проветриванием на сегодня являются вентиляция «по требованию» (ВПТ) [8] и системы автоматизированного управления проветриванием (САУП) [9]. Данные концепции преследуют единую цель – найти оптимальное распределение воздушных потоков по вентиляционной сети по критериям энергоэффективности и разбавления загрязняющих веществ, однако подходы к достижению этой цели у этих двух концепций различны [10, 11]. В рамках ВПТ уменьшение энергопотребления достигается преимущественно за счет динамического управления исходя из текущих потребностей в свежем воздухе для каждого из потребителей, при этом требуемый расход на главной вентиляторной установке (ГВУ) рассчитывается, исходя из заданных коэффициентов запаса воздуха из методики по расчету требуемого количества воздуха, принятой на руднике. В рамках САУП экономия достигается без использования информации о коэффициента запаса воздуха – это становится возможным благодаря специальным алгоритмам управления положительными и отрицательными регуляторами [9]. В конечном счете такой алгоритм позволяет дополнительно снизить энергопотребление на ГВУ. Также в САУП на калийных рудниках России и стран СНГ экономия электроэнергии дополнительно достигается за счет реализации систем рециркуляции воздуха.

Данная работа посвящена оценке возможных вариантов внедрения системы управления ВПТ на одном калийном руднике и оценки экономии воздуха и электроэнергии от внедрения данной системы. Необходимо отметить, что далее по тексту для обозначения ВПТ будет использоваться термин «динамическое управление проветриванием», более известный специалистам на территории России и стран СНГ.

### **Уровни управления проветриванием**

Под динамическим управлением проветриванием подразумевается такое обустройство системы вентиляции, при котором свежий воздух направляется только на те участки рудника, где он требуется, в количестве, необходимом для ведения горных работ и поддержания комфортных условий труда в течение заданного промежутка времени (например, в течение всей добычной смены). При этом в оставшейся части рудника расходы воздуха должны быть минимизированы [11, 12].

В качестве возможных вариантов управления проветриванием можно выделить три уровня управления в зависимости от наличия окон вентиляционных регулирующих (ОВР) на вентиляционных штреках панелей и блоков (табл. 1).

Таблица 1

Три уровня управления проветриванием

Уровни	АВД на главных направлениях	ОВР на панелях	ОВР на блоках
1	+	–	–
2	+	+	–
3	+	+	+

**Уровень № 1:** перераспределение расходов воздуха только между главными направлениями и крыльями рудника; расходы воздуха на панелях каждого направления не могут быть перераспределены системой управления; потенциальная экономия электроэнергии на проветривание направления может быть достигнута, только если на всех панелях данного направления снизятся соответствующие требуемые количества воздуха.

**Уровень № 2:** перераспределение расходов воздуха между главными направлениями, крыльями рудника и панелями внутри отдельных направлений (достигается за счет установки ОВР на вентиляционных штреках панелей); расходы воздуха на блоках каждой панели не могут быть перераспределены системой управления; потенциальная экономия электроэнергии на проветривание направлений и панелей может быть достигнута, только если на всех блоках одной или нескольких панелей снизится требуемый расход воздуха.

**Уровень № 3:** перераспределение расходов воздуха между главными направлениями и крыльями рудника, между панелями внутри отдельных направлений, а также между блоками отдельных панелей (достигается за счет установки ОВР на вентиляционных штреках блоков); потенциальная экономия электроэнергии на проветривание возможна при снижении требуемых расходов воздуха на любом из конечных потребителей.

Уровень № 3 требует наибольших капиталовложений, в то время как уровень № 1 – наименьших. При этом потенциальная экономия электроэнергии максимальна для уровня № 3 и минимальна для уровня № 1. Уровень № 2 во всех отношениях занимает промежуточное положение.

Проведенный анализ показал, что с учетом имеющегося на калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей регламента технологических производственных процессов при ведении горных работ и действующих нормативных ограничений по минимальной скорости воздуха в рабочих зонах внедрение уровней № 1 и № 2 управления проветриванием оказывается неэффективно. Это имеет две причины:

- 1) большое количество рабочих зон с комбайновыми комплексами, достаточно равномерно распределенных по всем панелям рудника (на одну панель приходится в среднем более 2 блоков с комбайновыми комплексами);
- 2) требуемый расход воздуха для большей части рабочих зон задан по фактору минимальной скорости воздуха как наиболее значимому.

По этим причинам дальнейшее снижение расхода воздуха на данных рабочих зонах чаще всего не может быть осуществлено в период простоя комбайна. В тех рабочих зонах, где количество воздуха рассчитывается по фактору «сероводород» или «метан», потенциальное снижение расхода воздуха в период простоя комбайна возможно. Однако оно становится достижимо только в том случае, если есть воз-

возможность оперативного перераспределения потоков внутри панели, так как в противном случае снижение воздуха на панель приведет не только к допустимому снижению воздуха в рассматриваемой рабочей зоне, но и к недопустимому снижению воздуха в других рабочих зонах панели, которые изначально могут проветриваться по фактору минимальной скорости воздуха. В связи с этим на рассмотренном руднике Верхнекамском месторождении управление проветриванием возможно только в рамках наиболее глубокого уровня № 3, и по этой причине далее будет рассмотрен анализ внедрения только уровня № 3.

### Моделирование работы комбайновых комплексов

Для задания модельного графика работы комбайновых комплексов (КК) использовалось среднее время простоя КК за смену и количество простоев за рабочую смену. Длительность рабочей смены принималась равной восьми часам. Принципиальной разницы в том, какое количество простоев задавать нет – на дальнейший результат это не влияет. По этой причине задавался один простой на одну рабочую смену. Типовой модельный график работы КК изображен на рис. 1.

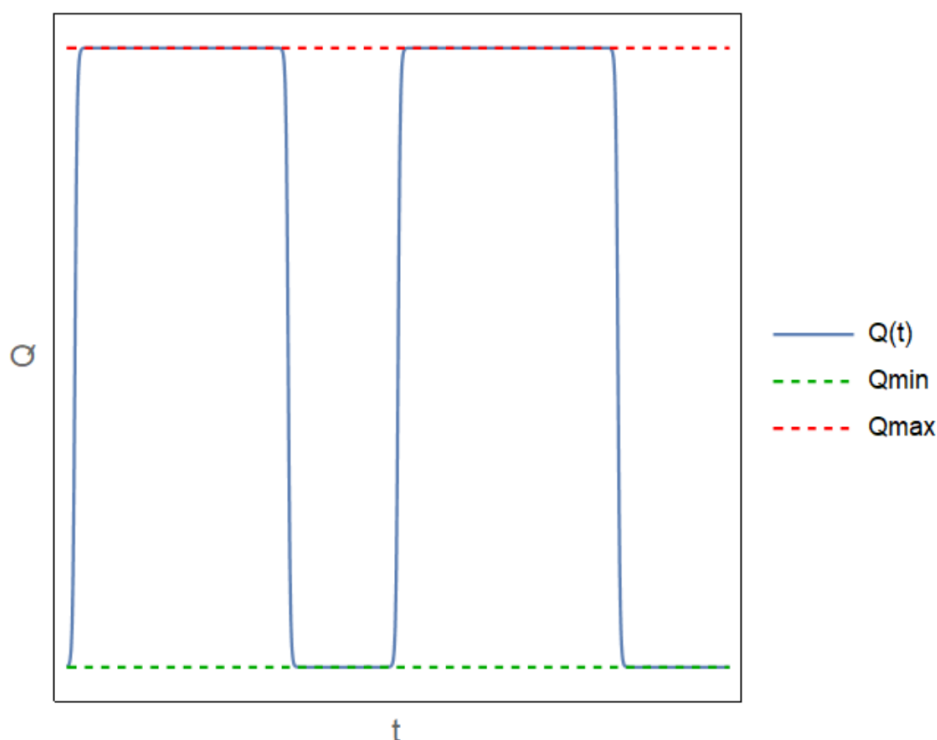


Рис. 1. Модельный график работы КК

На рис. 1  $Q_{\min}$  – минимальный расход воздуха, соответствующий проветриванию по фактору минимальной скорости при выключенном КК, а  $Q_{\max}$  – максимальный расход воздуха, соответствующий газовому фактору при работающем КК.

В случае работы двух или большего количества КК могут реализовываться разные ситуации – как синхронная работа КК, так и асинхронная работа с некоторым произвольным временем запаздывания  $i$ -го КК от 1-го КК. Наиболее пессимистичным случаем с точки зрения требуемого количества воздуха является ситуация, когда второй комбайн включается сразу после остановки первого, третий – после остановки второго и т. д. В этом случае при невозможности перераспределения воздуха между разными КК в пределах одного блока на соответствующий блок по-

дается постоянное количество воздуха, рассчитанное из условия одновременной работы всех КК.

Исходя из опыта проведения исследований на Верхнекамском месторождении, установлено, что среднее время простоя КК за рабочую смену составляет 40,8% от времени смены.

В дальнейшем на основе модели работы КК была рассмотрена экономия расхода воздуха и электроэнергии при управлении проветриванием между блоками шести панелей. На каждой панели различное количество работающих КК и требуемое количество воздуха на проветривание каждой рабочей зоны КК.

**Анализ экономии электроэнергии**

Для анализа принципиальной возможности экономии расхода воздуха и электроэнергии от внедрения динамического управления проветриванием был рассмотрен рудник, на котором возможно регулирование проветривания между блоками на шести панелях. Принималось, что при простое КК необходимо подавать в рабочую зону воздух с расходом 93 м<sup>3</sup>/мин ( $Q_{min}$ ), а при работающем КК средний расход по всем блокам составлял 108 м<sup>3</sup>/мин, максимальный – 158 м<sup>3</sup>/мин. В табл. 2 приводится количество КК на каждой панели.

**Таблица 2**

Количество КК на панелях

Панель	1	2	3	4	5	6
Количество КК	4	4	2	5	4	7

Временная зависимость расхода воздуха для каждой панели рассчитывалась по следующей формуле:

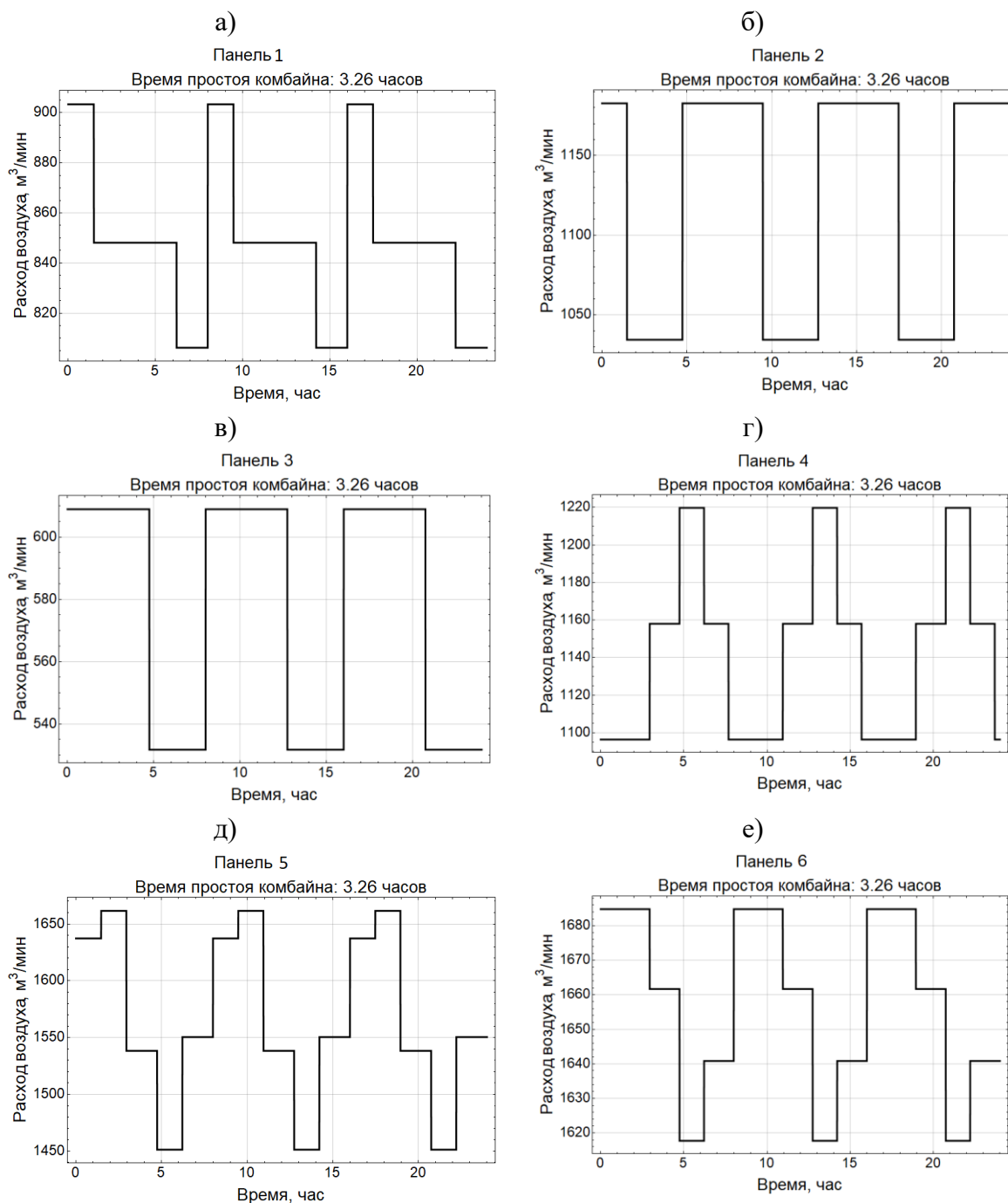
$$Q_n^*(t) = k_{yn} \sum_{\text{блок}} \left( k_{экон}(t) \sum_k k_{мин.р.з.} k_{возд} Q_{PЗ_k}^* \right), \tag{1}$$

где  $Q_n^*$ ,  $Q_{PЗ_k}^*$  – расходы воздуха на панели и в рабочей зоне при работающем КК, м<sup>3</sup>/мин;  $k_{yn}$ ,  $k_{мин.р.з.}$ ,  $k_{возд}$  – коэффициенты утечек воздуха;  $k_{экон}$  – коэффициент управления проветриванием.

Коэффициент управления проветриванием  $k_{экон}$  отвечает за управление проветриванием внутри блока в зависимости от работы и простоя КК:

$$k_{экон}(t) = \begin{cases} 1, & \text{хотя бы один КК на блоке в работе,} \\ \frac{Q_{min}}{\min_k Q_{PЗ_k}^*}, & \text{все КК на блоке простаивают,} \end{cases} \tag{2}$$

В итоге были получены временные графики с необходимым расходом воздуха для проветривания панели при работе каждой панели в три смены (см. рис. 2).



**Рис. 2.** Необходимый расход воздуха на панелях:  
(а) панель 1; (б) панель 2; (в) панель 3; (г) панель 4; (д) панель 5; (е) панель 6

Из полученных временных зависимостей расходов воздуха были рассчитаны средние по времени расходы воздуха на панелях. Данные средние величины использовались для подсчета экономии расхода воздуха и электроэнергии (см. табл. 3).

Принималось, что на рассматриваемый рудник при отсутствии управления проветриванием между блоками подавалось  $30543 \text{ м}^3/\text{мин}$  воздуха. Экономия расхода воздуха рассчитывалась относительно данной величины.

Потенциальная экономия электроэнергии рассчитывалась по следующей формуле:

$$100\% \cdot \left( 1 - \frac{N_{\min}}{N_{\max}} \right), \quad (3)$$

$$N_{\min} = \frac{R(Q_p^{\min})^3}{\eta_{ГВУ}},$$

$$N_{\max} = \frac{R(Q_p^{\max})^3}{\eta_{ГВУ}},$$

где  $N_{\min}$ ,  $N_{\max}$  – мощность, затрачиваемая на проветривание панелей при динамическом управлении проветриванием и без управления, Вт;  $R$  – величина аэродинамического сопротивления рудника,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$ ;  $\eta$  – КПД ГВУ;  $Q_p^{\min}$ ,  $Q_p^{\max}$  – расход воздуха, необходимый для проветривания рудника при динамическом управлении проветриванием и без управления,  $\text{м}^3 / \text{мин}$ . Принимается, что  $R = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$ ,  $\eta = 0,6$ .

Таблица 3

Экономия расхода воздуха и электроэнергии на руднике при наличии динамического управления проветриванием на блоках панелей

	Расход воздуха	Электроэнергия
Без динамического управления	30543 $\text{м}^3 / \text{мин}$	2199 кВт
С динамическим управлением	29406 $\text{м}^3 / \text{мин}$ (экономия $\approx 5,4 \%$ )	1865 кВт (экономия $\approx 15,2 \%$ )

Из табл. 3 видно, что наличие динамического управления проветриванием на блоках экономия электроэнергии приводит к на первый взгляд существенной экономии электроэнергии (более 15%). При этом экономия, выраженная в рублях в год, составит 10 млн. руб. в год (при стоимости электроэнергии 3,43 руб/кВт·ч).

Далее был проведен приблизительный анализ срока окупаемости установки ОВР на блоках каждой из шести панелей (см. рис. 3). Учитывалось, что капитальные затраты на материалы и установку ОВР составляют 7 млн. руб.

Расчеты показывают, что экономия электроэнергии на проветривание рудника за счет установки ОВР на блоках панелей недостаточно велика для того, чтобы перекрыть стоимость капитальных затрат на материалы и установку ОВР в оставшийся временной период эксплуатации рудника.

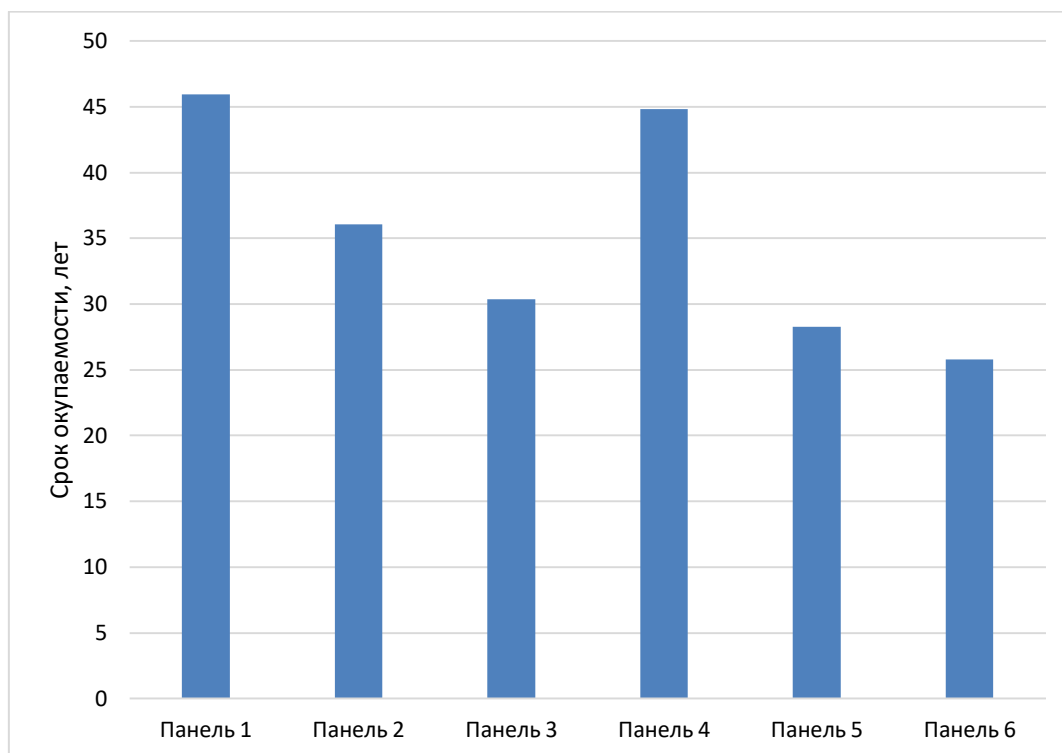


Рис. 3. Анализ срока окупаемости установки ОВР на блоках панелей

### Выводы

В рамках проведенной работы получены следующие основные результаты.

- Рассмотрены три возможных уровня управления в рамках системы динамического управления проветриванием (вентиляции «по требованию») по степени их глубины на одном из рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Первый уровень соответствует перераспределению воздуха только между главными направлениями, второй уровень включает в себя перераспределение воздуха между панелями внутри направлений, а третий, наиболее глубокий уровень, включает в себя перераспределение воздуха между блоками внутри панелей. Отмечено, что на месторождении принципиально возможна реализация только третьего уровня в связи с имеющимся на месторождении регламентом технологических производственных процессов при ведении горных работ и действующими нормативными ограничениями по минимальной скорости воздуха в рабочих зонах.
- Рассчитана экономия расхода воздуха и электроэнергии на одном из рудников при внедрении динамического управления проветриванием на блоках шести панелей рудника, на которых предполагается установка системы регулирования проветриванием третьего уровня.
- Экономия электроэнергии от внедрения динамического управления проветриванием на рассмотренном руднике составила 15,2%. С точки зрения финансов это составляет около 10 млн. руб. в год. Эта величина недостаточно велика для того, чтобы перекрыть стоимость капитальных затрат на материалы и установку отрицательных регуляторов на блоках панелей в предполагаемый временной период эксплуатации рудника.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.*



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Файнбург Г.З., Исаевич А.Г., Зайцев А.В. Повышение эффективности проветривания тупиковых комбайновых выработок калийных рудников по пылевому фактору // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 8. – С. 38-50. – DOI: 10.25018/0236-1493-2021-8-0-38.
2. Семин М.А., Исаевич А.Г., Жихарев С.Я. Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 2. – С. 178-191. – DOI: 10.15372/FTPRPI20210218.
3. Файнбург Г. З., Исаевич А. Г. Анализ микроциркуляционных потоков между микрозонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3. – С. 58-73. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.
4. Казаков Б.П., Круглов Ю.В., Шалимов А.В., Левин Л.Ю., Исаевич А.Г., Стукалов В.А. Совершенствование ресурсосберегающих систем вентиляции рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 81-83.
5. Womack J.P., Jones D.T. Lean Thinking. Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. – New York: Free Press, 2003. – 397 p.
6. Старков Л.И., Земсков А.Н., Кондрашев П.И. Развитие механизированной разработки калийных руд. – Пермь; Соликамск: Изд-во ПГТУ, 2007. – 522 с.
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. 785-793.
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. 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.
10. 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 // Изв. вузов. Горн. журн. – 2017. – № 1. – С. 101-108.
11. Tran-Valade T., Allen C. Ventilation-On-Demand key consideration for the business case // Proceedings of the Toronto 2013 CIM Conference. – Toronto, 2013.
12. Круглов Ю. В., Семин М. А. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12, № 9. – С. 106-115.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2021.3.16

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПО ФАКТОРУ МИКРОКЛИМАТА: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.В. Зайцев<sup>1</sup>, И.В. Поляков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Горный институт УрО РАН, г. Пермь

<sup>2</sup>ООО «ЕвроХим-Волгакалий», г. Котельниково

**Аннотация:** В статье описаны последние результаты по регулированию теплового режима на примере глубокого рудника. Описаны основные подходы к обеспечению безопасных условий труда горнорабочих при работе в условиях повышенных температур рудничного воздуха. Приведены направления совершенствования нормативной базы в области регламентирования параметров микроклимата горных выработок и организации работ, а также разработки шахтных систем кондиционирования воздуха.

**Ключевые слова:** глубокие рудники, микроклимат, тепловой режим, подземная система кондиционирования воздуха, моделирование, правила безопасности.