

УДК 622.4

НОРМАЛИЗАЦИЯ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ОТРАБОТКЕ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ЗАПАСОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ



Л. Ю. ЛЕВИН,
зам. директора
по научной работе,
д-р техн. наук



А. В. ЗАЙЦЕВ,
зав. сектором,
канд. техн. наук,
aerolog.artem@
gmail.com

Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия



С. В. БУТАКОВ,
директор,
ООО «Научно-
производственное
объединение
«АэроСфера»,
Пермь, Россия



М. А. СЕМИН,
научный сотрудник,
канд. техн. наук,
Горный институт
УрО РАН, Пермь,
Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований микроклиматических условий в горных выработках и характеристик источников тепловыделений при отработке глубокозалегающих запасов калийных рудников. Выполнено численное моделирование параметров регулирования теплового режима в длинных очистных забоях. Дано описание разработанной системы кондиционирования воздуха, приведены результаты ее испытаний и направления дальнейших работ по совершенствованию систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких горизонтов рудников ОАО «Беларуськалий».

Ключевые слова: глубокие рудники, горные выработки, тепловой режим, математическое моделирование, источники тепловыделения, кондиционирование воздуха, микроклимат, нормализация условий.

DOI: 10.17580/gzh.2018.08.14

Введение

В настоящее время на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий» вовлечены в отработку глубокозалегающие запасы полезных ископаемых – глубина ведения горных работ составляет 900 м, а температура окружающего породного массива +25 °С. В таких условиях в очистных горных выработках температура воздуха при работе горных машин и механизмов достигает +35 °С, что значительно превышает предельно допустимую действующими Правилами безопасности и Санитарными правилами и нормами Беларуси. Высокая температура воздуха приводит не только к снижению производительности труда и профессиональным заболеваниям горнорабочих, но и зачастую к отключению комбайновых комплексов из-за невозможности охлаждения мощных электродвигателей. В конечном итоге это влечет за собой снижение объемов добычи и создает трудности с обеспечением плановых показателей производства. Для нормализации микроклиматических условий ОАО «Беларуськалий» инициированы обширные экспериментальные и теоретические исследования процессов формирования неблагоприятных микроклиматических условий и способов их нормализации в горных выработках при отработке глубокозалегающих запасов калийной руды.

Исследование микроклиматических условий в горных выработках

Цель проведенных исследований заключалась в разработке способов нормализации микроклиматических условий горных выработок при отработке глубоких залежей калийных рудников.

Исследования были проведены в несколько этапов и включали:

- экспериментальную оценку температуры и влажности в подготовительных и очистных выработках, определение источников тепловыделения и их мощности;
- построение тепловой и вентиляционной модели исследуемого участка в АК «АэроСеть» и ее калибровку по данным экспериментальных исследований;
- оценку эффективности горнотехнических и теплотехнических мероприятий по нормализации микроклиматических параметров на разработанной модели;
- опытно-промышленные испытания предложенных способов нормализации микроклиматических параметров и анализ полученных результатов.

Следует отметить, что проблемы регулирования и обеспечения требуемых микроклиматических параметров атмосферы в подземных рабочих зонах глубоких шахт и рудников вызвали интенсивное развитие исследований в этой области в начале 1940-х годов. Проведены обширные исследования теплофизических процессов, формирующих тепловой режим шахт и рудников, а также разработаны методы прогноза термовлажностных параметров атмосферы горных выработок [1–12]. По результатам проведенных исследований сделан вывод, что в формировании теплового баланса и режима рудника может участвовать множество факторов, и при прогнозных расчетах распределения термовлажностных параметров рудничной атмосферы необходима количественная оценка каждого из них. Доля тех или иных факторов различна в зависимости от геологических и горнотехнических особенностей,

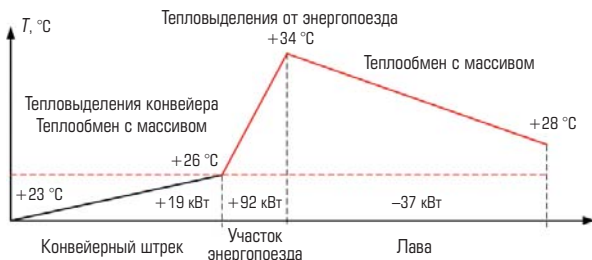


Рис. 1. Термограмма по тракту движения воздуха в панельных выработках

климатических условий региона расположения горного предприятия и требует экспериментальных исследований [5, 13].

Экспериментальные исследования проведены в условиях лав панелей № 2 и 4 гор. –440 м рудника Четвертого рудоуправления (РУ) ОАО «Беларуськалий», которые характеризуются глубиной ведения горных работ до 850 м и применением высокопроизводительных комбайновых комплексов SL-300/400 с установленной мощностью электродвигателей 800 кВт. Удаленность ведения горных работ от околоствольного двора достигает 12 км. На руднике используют центральную схему вскрытия с панельным способом подготовки. Система разработки столбовая с длинными очистными забоями, участки отработывают обратным ходом.

Первоначально установлены закономерности формирования микроклиматических параметров воздуха в выработках панелей. Для этого измерены расход, температура и влажность воздуха во всех горных выработках по тракту его движения от околоствольного двора до лавы и далее по вентиляционным выработкам. На **рис. 1** приведена термограмма по тракту движения воздушной струи в выработках лавы 2С-3 панели № 2 гор. –440 м рудника Четвертого РУ.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлена следующая картина изменения микроклиматических параметров воздуха [14]. При движении воздуха по главным воздухоподающим выработкам вследствие теплообмена с горными породами уже на расстоянии 3–4 км температура воздуха приближается к температуре горных пород, которая равна +24 °С. В пределах панельных воздухоподающих выработок из-за тепловыделений от конвейерных линий воздух дополнительно нагревается до +26 °С. Применение высокопроизводительного добычного оборудования приводит к мощным тепловыделениям непосредственно в длинных очистных за-

боях. В результате этого температура воздуха достигает +34 °С. Далее при движении по лаве вследствие контакта с обнаженным массивом горных пород температура воздуха уменьшается до +28 °С и продолжает уменьшаться при движении по вентиляционным штрекам.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить следующие основные факторы формирования теплового режима длинных очистных забоев (по степени увеличения влияния на микроклимат в лаве):

- температура воздуха, поступающего на проветривание панели;
- температура горных пород;
- тепломассообменные процессы между рудничным воздухом и породным массивом в выработках панелей и лавах;
- тепловыделения от конвейерных линий;
- тепловыделения от энергопоезда лавы.

Таким образом, наиболее неблагоприятные микроклиматические условия формируются на начальном участке лавы из-за тепловыделений энергопоезда, при дальнейшем движении воздуха интенсивный теплообмен с горными породами приводит к охлаждению и нормализации температуры воздушного потока.

Численное моделирование процесса регулирования теплового режима

На основе выполненных экспериментальных исследований в аналитическом комплексе «АэроСеть» [15] разработана и откалибрована тепловая и вентиляционная модель исследуемого участка (**рис. 2**).

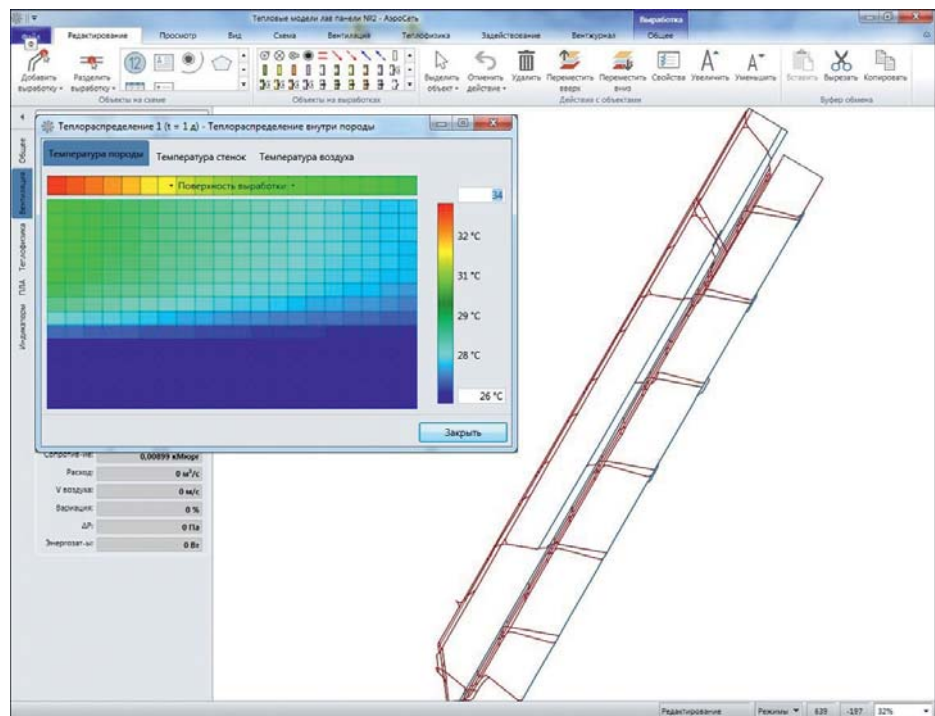


Рис. 2. Вентиляционная и тепловая модель панели № 2с-3 и рассчитанное теплораспределение в лаве и отработываемом пласте

Разработанная модель позволяет адекватно моделировать воздухораспределение в сети горных выработок, а также рассчитывать температуру и влажность воздуха в любой точке вентиляционной сети и окружающем массиве горных пород. Результаты расчета распределения температуры в лаве и отработываемом пласте показаны в виде градиентной заливки (см. рис. 2).

Перед исследованием способов регулирования теплового режима усовершенствована система нормирования микроклиматических параметров для условий рудников ОАО «Беларуськалий». Обосновано, что к нормированию следует принимать усредненную по длине лавы эффективную температуру воздуха. При этом эффективная температура воздуха учитывает комплексное влияние температуры, скорости движения и относительной влажности и рассчитывается по формуле $T = t + 0,11\varphi - 0,7v - 5,5$, где t – температура воздуха по сухому термометру, °С; φ – относительная влажность воздуха, %; v – скорость движения воздуха, м/с.

Предельное значение усредненной эффективной температуры воздуха следует принимать на основании действующих «Санитарных норм, правил и гигиенических требований к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников» (утверждены Министерством здравоохранения Республики Беларусь 13.01.2009 г.) в зависимости от длительности рабочей смены и категории выполняемых работ по энергозатратам. Разработанная система нормирования микроклиматических условий включена в Технологическую инструкцию по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудников Старобинского месторождения.

На следующем этапе выполнены теоретические и экспериментальные исследования эффективности различных способов регулирования теплового режима [1, 5, 16]. Теоретические исследования заключались в анализе и выборе приоритетных к исследованию способов регулирования теплового режима. В результате выделены следующие возможные способы, применимые в условиях рудников ОАО «Беларуськалий»:

- увеличение подачи воздуха на панель и лаву за счет максимального открытия регуляторов и повышения числа оборотов главной вентиляторной установки.
- увеличение подачи воздуха в лаве за счет организации рециркуляционного проветривания в пределах панели.
- снижение температуры воздуха за счет адиабатического увлажнения.
- кондиционирование воздуха с применением подземных фреоновых холодильных машин.

Увеличение подачи воздуха и скорости его движения является основным горнотехническим мероприятием, и оно отражено в первых двух вышеуказанных способах. Первый способ позволил увеличить скорость движения воздуха в лаве с 1 до 1,5 м/с, дальнейшее увеличение скорости движения воздуха в лаве удалось обеспечить только за счет применения локального рециркуляционного проветривания. Для этого в технологической сбойке, удаленной на 2 км от лавы, был установлен вентилятор ВМ-12А, направляющий 70 % исходящей по вентиляционному штреху струи воздуха на воздухоподающий штрех. При этом установлено,



Рис. 3. Эффективность различных способов регулирования теплового режима (красным цветом обозначены результаты экспериментальных измерений)

что исходящая вентиляционная струя принимает температуру окружающего массива +23 °С, избыточные теплопритоки от обогривания не влияют на температуру воздуха, подаваемого в лаву. Таким образом, организация рециркуляционного проветривания позволила увеличить скорость движения воздуха до 2,5 м/с. Третий и четвертый способы являются теплотехническими мероприятиями, требующими применения средств кондиционирования воздуха.

Для каждого из рассмотренных способов проведено многовариантное численное моделирование распределения микроклиматических параметров в лаве, воздухоподающих и вентиляционных выработках панели в аналитическом комплексе «АэроСеть» на разработанной тепловой модели. На рис. 3 показано сравнение их эффективности в условиях рудников ОАО «Беларуськалий». Также здесь представлены результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в лаве при реализации первого и второго способов.

Согласно приведенным результатам исследований, снижение температуры воздуха до требуемых правилами техники безопасности +26 °С возможно только за счет применения подземных систем кондиционирования воздуха. По этой причине на заключительном этапе исследований разработана система кондиционирования воздуха (СКВ) для условий рудников ОАО «Беларуськалий».

Технология кондиционирования рудничного воздуха

Подземная установка кондиционирования воздуха должна обеспечивать надежное охлаждение воздуха, поступающего на проветривание лавы, и эмульсии, подаваемой для охлаждения двигателей комбайна. Эта особенность учтена посредством разработки оригинальной схемы с отдельной подачей хладоносителя СКВ для охлаждения электродвигателей комбайна и воздухоохлаждителей на энергопоезде комбайна.

Разработанная для условий рудников ОАО «Беларуськалий» СКВ включает:

- холодильную машину;
- насосный агрегат;
- агрегат охлаждения эмульсии для конденсатора;
- силовой блок холодильной машины РК-130;

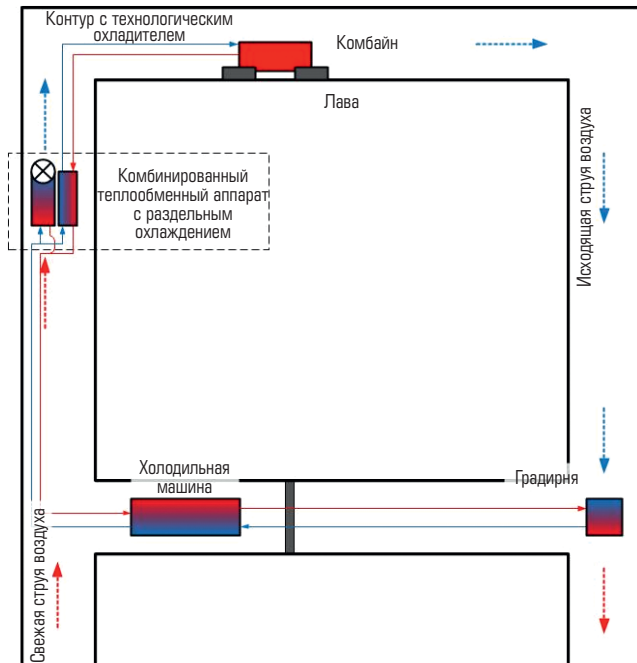


Рис. 4. Структурная схема системы кондиционирования воздуха для глубоких лав рудников ОАО «Беларуськалий»

- комбинированный теплообменный аппарат «хладоноситель – воздух – эмульсия»;
- комплект трубопроводов для организации циркуляционных контуров в системах «воздухоохладитель – холодильная машина» и «холодильная машина – сухая градирня».

В предлагаемой технологической схеме работы СКВ в качестве хладоносителя использована водомасляная эмульсия, применяемая в существующем оборудовании лавы, что частично позволит унифицировать эксплуатационные материалы.

Структурная схема разработанной СКВ представлена на **рис. 4**. Следует отметить, что для отведения тепловыделений системы кондиционирования воздуха наиболее целесообразным представляется вариант размещения сухой градирни в вентиляционном штреке на исходящей струе. С этой целью в процессе подготовки панелей рекомендуется проведение технологических сбоек между воздухоподающими и вентиляционными выработками для возможности установки системы кондиционирования воздуха.

Разработанная технология реализована ООО «НПО «АэроСфера» в системе кондиционирования воздуха СКВ-250, основные технические параметры которой представлены ниже.

Холодопроизводительность, кВт, не менее	250
Расход охлаждаемого воздуха, м³/с, не менее	10
Эффект охлаждения воздуха, °С, не менее	12
Холодильный агент	Фреон R134a

Технологический хладоноситель:

градирня	Вода дистиллированная
воздухоохладитель	Водогликолевый раствор (этиленгликоль 10 % с присадками ГОСТ 19710-83)

Мощность электродвигателя компрессора, кВт	200
Напряжение питающей сети при частоте 50 Гц, В	660
Температура хладоносителя на выходе, °С	3
Температура хладоносителя на входе, °С	9,2
Расход хладоносителя, м³/ч	35
Расход оборотной воды, м³/ч	70
Температура оборотной воды на входе, °С	58,5
Температура оборотной воды на выходе, °С	64
Запыленность окружающей среды, мг/м³, не более	1000
Скорость движения потока воздуха, м/с, не более	6
Предельная концентрация агрессивных газов и паров в окружающей среде, мг/м³ в сутки, не более:	
сернистый газ	0,1
хлориды	10

На **рис. 5** изображены установленные в технологической сбойке воздухоохладитель и вентилятор системы кондиционирования воздуха.

Заключение

Таким образом, в условиях лавы № 8 столба № 2с-4 успешно выполнены опытно-промышленные испытания разработанной технологии и оборудования системы кондиционирования воздуха.



Рис. 5. Установленные в технологической сбойке воздухоохладитель и вентилятор системы кондиционирования воздуха

вания воздуха — температура воздуха на начальном участке лавы снижена с +34 до +26 °С.

В перспективе планируется усовершенствовать предложенную технологию за счет строительства камеры холодильных машин в месте сопряжения выработок панели с выработками направления для возможности утилизации избыточных тепловыделений в исходящую струю воздуха вентиляционных штреков направления. Это позволит обеспечить подземные градиры

большим объемом воздуха с меньшими температурами и достичь независимости работы установки от режима проветривания лавы. Кроме того, исчезает необходимость перемонтажа установки по мере отработки столба лавы. Реализация разработанных решений дает возможность обеспечить безопасные микроклиматические условия в длинных очистных забоях калийных рудников ОАО «Беларуськалий» при выемке глубокозалегающих запасов.

Библиографический список

1. Щербань А. Н., Кремнев О. А., Журавленко В. Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
2. Шувалов Ю. В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: ресурсосберегающие системы. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. – 196 с.
3. Гендлер С. Г. Тепловой режим подземных сооружений. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1987. – 102 с.
4. Красноштейн А. Е., Медведев И. И. Аэрология калийных рудников. – Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1990. – 251 с.
5. Gendler S. G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface // *Eurasian Mining*. 2016. No. 2. P. 41–44. DOI: 10.17580/em.2016.02.10
6. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining // *Platinum in transition «Boom or Bust»*: Proceedings of the 4th International Platinum Conference. – Sun City, 2010.
7. Funnel R. C., Bluhm S. J., Sheer T. J. Optimization of Cooling Resources in Deep Stopes // *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. – Cracow, 2001. P. 391–398.
8. Cheng J., Wu Y., Xu H., Liu J., Yang Y. et al. Comprehensive and Integrated Mine Ventilation Consultation Model—CIMVCM // *Tunneling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 45. P. 166–180.
9. Litvinovskaya N. A., Andreiko S. S. Modeling sudden failure of floor of underground excavations in undermined salt rock mass // *Eurasian Mining*. 2015. No. 2. P. 15–17. DOI: 10.17580/em.2015.02.04
10. Zhou A., Wang K., Wu L., Xiao Y. Influence of gas ventilation pressure on the stability of airways airflow // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28. Iss. 2. P. 297–301.
11. Vintró C., Sanmiquel L., Freijo M. Environmental sustainability in the mining sector: evidence from Catalan companies // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84. P. 155–163.
12. Du J., Li H., Wang L. Thermodynamic stability conditions, methane enrichment, and gas uptake of ionic clathrate hydrates of mine ventilation air // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 273. P. 75–81.
13. Карелин В. Н., Кравченко А. В., Левин Л. Ю., Казаков Б. П., Зайцев А. В. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников // *Горный журнал*. 2013. № 6. С. 65–68.
14. Зайцев А. В. Комплексные исследования в области обеспечения безопасных микроклиматических условий в длинных очистных забоях калийных рудников ОАО «Беларуськалий» // *Стратегия и процессы освоения георесурсов*. – Пермь: Изд-во ГИ УрО РАН, 2015. Вып. 13. С. 260–263.
15. Документация / АэроСеть. URL: <http://aeroset.net/downloads/docs> (дата обращения: 19.04.2018).
16. Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Современные подходы к разработке способов управления тепловым режимом рудников при высокой температуре породного массива // *Горный журнал*. 2014. № 5. С. 22–25. **ГЖ**

«GORNYY ZHURNAL», 2018, № 8, pp. 97–102
DOI: 10.17580/gzh.2018.08.14

report its test data and mark out further research to improve microclimate normalization systems in deep-level mines of Belaruskali.

Normalization of microclimate in deep potash mines

Keywords: deep mines, mine roadways, thermal conditions, mathematical modeling, heat emission sources, air conditioning, microclimate, normalization.

Information about authors

A. V. Zaitsev¹, Head of Sector, Candidate of Engineering Sciences, aerolog.artem@gmail.com

L. Yu. Levin¹, Deputy Director of Science, Doctor of Engineering Sciences

S. V. Butakov², Director

M. A. Semin¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹ Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

² AeroSfera Research and Production Association, Perm, Russia

Abstract

Currently Belaruskali develops deep-level potash salt reserves of the Starobinsk deposit. Rock mass temperature reaches +25 °С, and, considering heat emission of high-capacity mining equipment, mine air temperature rises up to +35 °С. As a consequence, labor conditions of miners are uncomfortable, and equipment can cut out because of thermal overload. This article presents experimental research findings on microclimate in mine roadways and characteristics of heat emission sources in deep-level mining of potash reserves. Based on the experimental data and using the analytical system AeroSet, the heat and ventilation models are constructed for development entries and production headings in the study area. Numerical modeling of thermal control efficiency in longwalls is performed. It is found that the most efficient activity is air conditioning. The microclimate normalization system is substantiated during the research. The developed technology for mine air conditioning ensures normalization of microclimate in longwalls and cooling of power equipment. The authors describe the developed air conditioning system,

References

1. Shcherban A. N., Kremnev O. A., Zhuravlenko V. Ya. Manual on Thermal Control in Mines. Moscow : Nedra. 1977. 359 p.
2. Shuvalov Yu. V. Thermal Control in Mines in the North: Resource-Saving Systems. Leningrad : Izdatelstvo LGU, 1988. 196 p.
3. Gendler S. G. Thermal Conditions of Underground Structures. Leningrad : LGI, 1987. 102 p.
4. Krasnoshtein A. E., Medvedev I. I. Aerology of Potassium Mines. Sverdlovsk : Izdatelstvo UrO AN SSSR, 1990. 251 p.
5. Gendler S. G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface. *Eurasian Mining*. 2016. No. 2. pp. 41–44. DOI: 10.17580/em.2016.02.10
6. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining. *Platinum in Transition “Boom or Bust”*: Proceedings of the 4th International Platinum Conference. Sun City, 2010.
7. Funnel R. C., Bluhm S. J., Sheer T. J. Optimization of cooling resources in deep stopes. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. Cracow, 2001. pp. 391–398.
8. Cheng J., Wu Y., Xu H., Liu J., Yang Y. et al. Comprehensive and Integrated Mine Ventilation Consultation Model—CIMVCM. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 45. pp. 166–180.

9. Litvinovskaya N. A., Andreiko S. S. Modeling sudden failure of floor of underground excavations in undermined salt rock mass. *Eurasian Mining*. 2015. No. 2. pp. 15–17. DOI: 10.17580/em.2015.02.04
10. Zhou A., Wang K., Wu L., Xiao Y. Influence of gas ventilation pressure on the stability of airways airflow. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28, Iss. 2. pp. 297–301.
11. Vintró C., Sanmiquel L., Freijo M. Environmental sustainability in the mining sector: evidence from Catalan companies. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84. pp. 155–163.
12. Du J., Li H., Wang L. Thermodynamic stability conditions, methane enrichment, and gas uptake of ionic clathrate hydrates of mine ventilation air. *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 273. pp. 75–81.
13. Karelin V. N., Kravchenko A. V., Levin L. Yu., Kazakov B. P., Zaitsev A. V. Features of forming microclimate conditions in mining excavations of deep mines. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 6. pp. 65–68.
14. Zaitsev A. V. Integrated research in the sphere of safe microclimate conditions for longwalls in potash mines of Belaruskali. *Strategy and Processes of Geo-Resources Management: Collection of Scientific Papers*. Perm : Izdatelstvo GI UrO RAN, 2015. Iss. 13. pp. 260–263.
15. AerSet. Available at: <http://aerosep.net/downloads/docs> (accessed: 19.04.2018).
16. Kazakov B. P., Levin L. Yu., Zaitsev A. V. Modern approaches to development of methods of controlling thermal modes of mines with high temperature of rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 5. pp. 22–25.

