https://mst.misis.ru/

Perestoronin M. O. et al. Experimental study of transient thermal conditions in longwall faces

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-37-48



Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов длинных очистных забоев

М.О. Пересторонин ⊠, А.В. Зайцев SC, М.А. Семин DSC, Д.А. Бородавкин

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация

⊠ per.maks1m.97@gmail.com

Аннотация

В условиях ограниченности минеральных ресурсов современные шахты и рудники стремятся к добыче все более труднодоступных и глубокозалегающих запасов полезных ископаемых. Увеличение глубины ведения горных работ приводит к возникновению проблем, связанных с обеспечением комфортных и безопасных условий труда в горных выработках. Основной задачей создания благоприятного микроклимата для горнорабочих является обеспечение допустимых значений температуры воздуха в рабочих зонах глубоких горизонтов шахт и рудников. На сегодняшний день особый интерес вызывают процессы формирования теплового режима в длинных очистных забоях (лавах), в которых применяется высокопроизводительное транспортно-добычное оборудование. В связи с этим в работе проводится исследование, направленное на определение особенностей формирования теплового режима в длинных очистных забоях. Исследование основано на экспериментальных данных, полученных в условиях лавы № 1 первой северной панели горизонта -440 м рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». Результаты экспериментального изучения динамических микроклиматических параметров воздуха позволили установить, что тепловой режим в лаве носит переменный характер. Это обусловлено тем, что при ведении горных работ в лаве технологический цикл отработки запасов полезных ископаемых включает добычные и ремонтные смены, характеризующиеся различными мощностями тепловыделений. При этом влияние тепловой инерции оборудования в период его остановки в ремонтную смену играет важную роль в формировании теплового режима. Предполагается, что результаты экспериментального исследования переходных тепловых режимов в лаве при переходе от добычных смен к ремонтным выступят основой при разработке математической модели теплообменных процессов в горных выработках, способной учитывать нестационарную природу техногенных источников тепловыделений. Разработанная математическая модель позволит принимать наиболее безопасные и эффективные технико-экономические технологические решения по управлению проветриванием лав.

Ключевые слова

рудничная вентиляция, лава, проветривание, экспериментальное исследование, тепловой режим, рудничный микроклимат, тепловыделение, теплообмен, нагрев воздуха

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 19-77-30008.

Для цитирования

Perestoronin M.O., Zaitsev A.B., Semin M.A., Borodavkin D.A. Experimental study of transient thermal conditions in longwall faces. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):37–48. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-37-48

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research article

Experimental study of transient thermal conditions in longwall faces

M.O. Perestoronin 🖂, A.B. Zaitsev 🚾, M.A. Semin 💿 🚾, D.A. Borodavkin

Abstract

With limited mineral resources, existing mines are seeking to extract increasingly hard-to-reach and deep-seated mineral reserves. Increasing mining depth leads to problems connected with the provision of comfortable and safe working conditions. The main objective of creating favorable microclimate for miners is to provide acceptable values of air temperature in working areas at deep levels. Of particular interest are processes of formation of thermal conditions in longwall faces (longwalls), where high-performance hauling

elSSN 2500-0632 https://mst.misis.ru/



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Пересторонин М. О. и др. Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов...

and mining equipment is used. We conducted a study to determine the formation of the thermal conditions in longwall faces. The study was based on experimental data obtained in the conditions of longwall face No. 1 of the first northern panel at the -440 m level of 4 RU mine of JSC "Belaruskali". The findings of the experimental study of the dynamic microclimatic air parameters allowed us to establish that the thermal conditions in longwall faces were variable. This is due to the fact that during mining operations in longwall faces, the mining process cycle includes mining and maintenance shifts, characterized by different levels of heat release. The influence of thermal inertia of the equipment during shutdown for the maintenance shift plays an important role in the formation of thermal conditions. The findings of the experimental study of transient thermal modes in a longwall face during transition from mining shifts to maintenance shifts will form a basis for developing a mathematical model to calculate the heat exchange processes in mine workings (longwall faces). These will take into account the non-stationary nature of the technogenic heat release sources. The mathematical model will allow the safest and most effective technical and economic process solutions to be implemented, in order to control longwall face ventilation.

Keywords

mine ventilation, longwall, air supply, experimental study, thermal conditions, mine microclimate, heat release, heat exchange, air heating

Acknowledgements

2022;7(1):37-48

The research was carried out with financial support of the Russian Science Foundation under the project No. 19-77-30008.

For citation

Perestoronin M.O., Zaitsev A.B., Semin M.A., Borodavkin D.A. Experimental study of transient thermal conditions in longwall faces. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2022;7(1):37–48. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-37-48

Введение

Предприятие ОАО «Беларуськалий» является одним из крупнейших производителей минеральных удобрений в мире. В пределах его рудников добыча минеральных солей и их продуктов осуществляется на большом интервале глубин – от 360 до 820 м. При этом глубина ведения горных работ с течением времени продолжает увеличиваться. Учитывая, что геотермальная ступень для недр в районе ведения предприятием добычи полезных ископаемых составляет от 50 до 65 м¹, на нижних высотных отметках залежи температура массива может достигать +26 °C. Необходимо отметить, что добычные работы в пределах рудников «Беларуськалия» в большинстве случаев ведутся посредством столбовой системы разработки с использованием комбайнового комплекса, характеризующегося высокими тепловыделениями. Эти факторы значительно влияют на формирование теплового режима рудников [1, 2] и, очевидно, могут способствовать возникновению в рабочих зонах неблагоприятного для людей микроклимата, характеризующегося температурой воздуха сверх допустимой величины +26 °C².

Согласно исследованию [3] длительная физическая работа человека в условиях высокой температуры окружающей среды приводит к повышению температуры тела, обезвоживанию организма, замедлению реакции, снижению умственной и физической способностей. Эти процессы, во-первых, оказывают отрицательное влияние на функционирование систем и органов человека, а во-вторых, способствуют быстрой утомляемости рабочего и снижению производительности его труда [4].

Кроме этого, высокие температуры окружающей среды негативно сказываются на работе оборудования комбайнового комплекса: при недостаточно быстром отведении теплоты происходит его преждевременный износ, а при перегревании – вынужденное отключение [5].

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что исследования, направленные на изучение микроклимата подземных рабочих зон, факторов, его определяющих, и способов его нормирования, являются особо необходимыми. В случае изучения микроклимата длинных очистных забоев (лав) весьма актуальным является вопрос распределения температуры воздуха на всем ее протяжении – от энергопоезда комбайна, являющегося главным источником тепловыделений в лаве, до вентиляционных штреков.

На сегодняшний день исследования теплообменных процессов в подземных выработках осуществляются, как правило, с использованием математических моделей тепло-, влаго- и воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети [2, 6–8]. Существующие модели [9–11] способны рассматривать техногенные источники тепловыделений (горные машины и оборудование) только в режимах «работы» и «останова». При этом для первого режима тепловыделения принимаются постоянными, а в случае второго режима – тождественно равными нулю. Таким образом, данные модели фактически описывают стационарные аэрологические процессы в системе горных выработок.

В действительности горное оборудование обладает конечной теплоемкостью и при работе испытывает нагрев (как и окружающий массив). После его отключения происходят продолжительные тепловыделения от нагретых тел, уменьшающиеся с течением времени

¹ Инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудников Старобинского месторождения. Солигорск-Пермь; 2018. 93 с.

² Правила промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь с изменениями. Утв. Постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 10 апреля 2014 г., № 10.



2022;7(1):37-48

от максимальных значений, соответствующих штатному режиму работы, вплоть до нуля (при условии достаточно длительной остановки). Другими словами, оборудованию свойственна тепловая инерция [12]. Ее учет важен для корректного моделирования аэрологических процессов в рудничных вентиляционных сетях.

Для разработки корректной модели теплообменных процессов в горных выработках, способной учитывать нестационарную природу техногенных источников тепловыделений, требуются исходные данные, отражающие изменение микроклиматических параметров рудничной атмосферы при разных режимах проветривания и работы транспортно-добычного оборудования.

Среди научных работ, содержащих результаты исследований особенностей формирования микроклимата в рудниках России и стран ближнего зарубежья, высокую ценность представляют труды [13] и [14]. В свою очередь, среди литературы стран дальнего зарубежья необходимо выделить работы, описывающие подземный микроклимат в рудниках Канады [15], Индии [16, 17] и ЮАР [18]. Однако обзор существующей международной литературы показывает, что имеющийся опыт исследований микроклиматических условий рудников имеет недостаточно детальную экспериментальную и практическую базу, подходящую для математического моделирования процессов теплообмена между транспортно-добычным оборудованием и рудничным воздухом. Таким образом, необходимы дополнительные экспериментальные исследования, направленные на определение степени влияния параметров воздуха, поступающего на проветривание, и параметров работы оборудования на температуру воздуха в выработках с течением времени.

Целью данной работы было экспериментальное исследование переходных тепловых режимов длинных очистных забоев. Объектом исследования выступала лава № 1 первой северной панели горизонта –440 м рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». Для достижения поставленной цели в процессе выполнения работы были решены следующие задачи:

1) определено распределение воздуха в столбе лавы;

2) определено влияние вентилятора энергопоезда на скорость остывания оборудования;

3) определено изменение температуры воздуха вблизи оборудования с течением времени при его работе и остановках;

4) определены распределения температуры воздуха по длине лавы с течением времени.

Объект исследования

Столб лавы № 1 отрабатывается обратным порядком и включает в себя: три штрека (один конвейерный и два вентиляционных) и очистную выработку – лаву. Для проветривания столба свежая струя воздуха из главного транспортного штрека направления поступает в конвейерный штрек лавы и затем в очистную выработку. Исходящая из лавы струя воздуха удаляется по вентиляционным штрекам лавы на вентиляционный штрек направления рудника. Принципиальная схема проветривания лавы № 1 представлена на рис. 1.





Пересторонин М. О. и др. Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов.

В проветривании рабочей зоны лавы № 1 участвуют: вентиляторные установки главного проветривания, вентилятор вспомогательного проветривания ВМ-12, располагаемый у основания столба лавы, а также вентилятор энергопоезда комбайна.

Вентилятор энергопоезда комбайна Korfmann обеспечивает распределение воздуха между конвейерным и транспортным штреками и способствует увеличению количества воздуха в лаве. Он включается одновременно с началом работы комбайнового комплекса и отключается спустя 5–10 мин после прекращения его работы. В свою очередь, главные вентиляторные установки и вентилятор BM-12 находятся в работе постоянно и не зависят от режима работы лавы.

Необходимо пояснить, что под рабочей зоной лавы понимается сама очистная выработка, а также примыкающая к ней часть конвейерного штрека, в которой располагается энергопоезд комбайнового комплекса, поскольку в этих выработках находится персонал, осуществляющий добычу руды и обслуживание оборудования.

В состав комбайнового комплекса лавы входят: очистной комбайн, забойный скребковый конвейер, механизированная крепь, крепь сопряжения и энергопоезд (станция управления, насосные станции и насосная установка). Расстановка оборудования в лаве № 1 представлена на рис. 2. В настоящее время стандартный график ведения работ на рудниках ОАО «Беларуськалий» ежесуточно включает три добычные смены и одну ремонтную, продолжительностью 6 ч каждая. Зачастую для обслуживания оборудования комбайнового комплекса между добычными сменами не требуется полноценной ремонтной смены, которая заменяется кратковременной ревизией оборудования с остановкой на 2–3 ч.

Методология исследования

Экспериментальное исследование лавы № 1 проводилось при переходе ее от добычной смены к ремонтной для разных режимов проветривания лавы.

Вентилятор ВМ-12 и вентилятор энергопоезда во время эксперимента не имели возможности регулирования параметров работы, поэтому изменение режимов проветривания лавы осуществлялось посредством регулирования утечек свежей струи воздуха через конвейерную сбойку № 4 путем изменения параметров установки вентиляционного паруса в ней.

Предполагалось, что главные вентиляторные установки в период проведения исследования не способствовали изменению с течением времени количества воздуха, подаваемого на проветривание столба лавы.



Рис. 2. Расположение оборудования в лаве № 1

Perestoronin M. O. et al. Experimental study of transient thermal conditions in longwall faces

В ходе эксперимента исследовались четыре режима проветривания лавы:

1) режим № 1 – расход воздуха в лаве для добычной и ремонтной смен постоянный;

2) режим № 2 – расход воздуха в лаве снижается сразу после завершения добычной смены и отключения оборудования;

3) режим № 3 – расход воздуха в лаве после завершения добычной смены первоначально остается прежним, однако через некоторое время значительно снижается;

4) режим № 4 – постепенное снижение расхода воздуха в лаве при наступлении ремонтной смены.

Измерения температуры воздуха осуществлятемпературно-влажностными лись непрерывно датчиками Kestrel, установленными в районе 4-й и 124-й секций механизированной крепи, и периодически контролировались ручными инструментальными замерами с помощью термовлагомера Fluke 971. Выбор названных секций обусловлен отсутствием прямого воздействия на них теплового потока от энергопоезда и в то же время показательностью замеров, обеспечивающих понимание, как меняется температура воздуха при прохождении лавы. Датчики устанавливались на механизированной крепи под кровлей выработки на высоте 2,0-2,2 м. Место установки температурно-влажностных датчиков в поперечном сечении очистной выработки выбрано исходя из условия сохранности измерительных приборов при ведении горных работ в лаве. Наглядное представление расположения температурно-влажностных датчиков Kestrel в поперечном сечении лавы представлено на рис. 3.

Кроме перечисленного, при помощи инфракрасного термометра (пирометра) Fluke 568 измерялись температуры груди забоя лавы и поверхности различных элементов оборудования, размещенного в лаве и конвейерном штреке. Измерение скорости воздушной струи производилось анемометром АПР-2. Измерение поперечного сечения горных выработок осуществлялось лазерным дальномером Leica Disto D3. Объемный расход воздуха вычислялся как произведение измеренных скорости воздуха и площади поперечного сечения.

Измерительные приборы, используемые при экспериментальном обследовании лавы № 1, имеют следующие погрешности измерений: 1) температурно-влажностный датчик Kestrel – температура ±0,9 °С, влажность ±2,0 % RH;

2) термовлагомер Fluke 971 – температура ±0,5 °С, влажность ±2,5 % RH;

3) пирометр Fluke 568 – температура ±1,0 °C;

4) анемометр АПР-2 – скорость $\Delta = 0,2 + 0,05\nu$, м/с (ν – скорость воздуха, м/с);

5) лазерный дальномер Leica Disto D3 – длина $\Delta = 0,15l$ мм (l – измеряемая длина, м).

Результаты исследования

Из рассчитанных по данным эксперимента расходов воздуха в столбе лавы № 1 следует, что с учетом утечек через транспортные и конвейерные сбойки в очистной забой поступает не более 43 % от общего количества воздуха, подаваемого на проветривание столба. Из очистного забоя в вентиляционные штреки лавы исходит на 15,6–22,4 % больше воздуха, чем поступает в него через конвейерный штрек. Это связано с наличием притока воздуха из выработанного пространства лавы, куда он попадает из транспортного штрека.

При включенном в добычную смену вентиляторе BM-12, расположенном в начале столба лавы, вентилятор энергопоезда увеличивает количество воздуха, проходящего через энергопоезд лавного комбайна, примерно на 12,4 %, что составляет добавочные 0,82 м³/с. Однако расход воздуха, исходящего из очистного забоя через вентиляционные штреки № 1 и № 2, остается практически одинаковым при включенном и отключенном вентиляторе энергопоезда. Таким образом, при наличии на панели других источников проветривания вентилятор энергопоезда не оказывает влияния на общее проветривание лавы, но обеспечивает локальное увеличение расхода воздуха в конвейерном штреке и усиливает поток воздуха, непосредственно омывающий оборудование энергопоезда лавного комбайна, в том числе теплообменный аппарат системы охлаждения комбайна, являющийся основным источником тепловыделений.

Исследование температур поверхностей нагретых тел в лаве показало, что при температуре свежей струи воздуха 25,6 °С температура различных частей комбайна в ремонтную смену (спустя 1,5 ч после выключения оборудования) достигает 50 °С. Температура механизированной крепи на всех участках лавы практически совпадает с температурой воздуха в выработке, либо несущественно превышает её.



Рис. 3. Расположение температурно-влажностных датчиков Kestrel в поперечном сечении лавы

eISSN 2500-0632

https://mst.misis.ru/



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

2022;7(1):37-48

Пересторонин М. О. и др. Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов.

На сопряжении конвейерного штрека и лавы температура первых секций крепи достигает 34,9 °С, что объясняется ее близким расположением к энергопоезду лавного комбайна. Кроме комбайнового комплекса из наиболее нагретых элементов оборудования можно выделить привод забойного конвейера, имеющий температуру от 44 до 56 °С, а также сам забойный конвейер с температурой 35,4 °С в районе 4-й секции крепи.

Результаты измерений температуры воздуха в рабочей зоне лавы № 1 температурно-влажностными датчиками приведены на рис. 4. Показания датчиков контролировались замерами термовлагомера.

На основании выполненных замеров температуры воздуха произведен расчет средних мощностей тепловыделений, кВт, от оборудования энергопоезда лавного комбайна и привода лавного конвейера по формуле [2]:

$$W = c_0 O \Delta T. \tag{1}$$

где с – массовая теплоемкость воздуха, принимается равной 1,005 кДж/(кг · °С); ρ – плотность воздуха, принимается равной 1,25 кг/м³; Q – расход нагреваемого объема воздуха, м³/с; ΔT – разница температуры воздуха до и после взаимодействия с источником тепловыделений, °С.

Расчет мощности тепловыделений от оборудования выполнен без учета энтальпии воздуха по той причине, что водопроявления в калийных и соляных рудниках отсутствуют и влагосодержание воздуха, движущегося в лаве, является приблизительно постоянной величиной.

Обобщенные результаты температурной съемки лавы № 1 в районе ее сопряжения с конвейерным штреком представлены в табл. 1.



Рис. 4. Изменения температуры воздуха в лаве № 1, регистрируемые температурно-влажностными датчиками

Результаты температурной съемки давы № 1

Таблица 1

		Вентилятор энергопоезда	Q, м ³ /с	Длительность	T _{max} , ℃	T _{min} , ℃	W _{ср} , кВт	dT/dt, ʻ	°С/мин	
Режим 1	Д	включен	7,46	17 ч 29 мин	38,3		98,2			
	Р	отключен	6,92	10 ч 2 мин	37,1	29,1	52,6	0,0)13	
Режим 2	Д	включен	7,54	14 ч 9 мин	38,1		100,7			
	Р	отключен	5,05	9ч2мин	37,2	30,0	41,4	0,012		
Режим 3	Д	отключен	7,23	20 ч 51 мин	36,7		82,2			
	Р	отключен	6,45	1 ч 25 мин	34,8	31,7	54,3	0,037	0.010	
	Р	отключен	4,97	6 ч 10 мин	31,7	29,8	31,2	0,005	0,012	
Режим 4	Д	отключен	7,54	14 ч 55 мин	38,5		93,2			
	Р	отключен	6,68	1 ч 0 мин	38,2	33,8	85,7	0,075		
	Р	отключен	4,43	2 ч 9 мин	33,8	30,6	36,3	0,026	0,017	
	Р	отключен	6,61	4 ч 5 мин	32,4	30,7	48,1	0,007		

Условные обозначения: Д – добычная смена, Р – ремонтная смена, Q – расход воздуха, омывающего энергопоезд, м³/с, $T_{\rm max}$ – максимальная температура воздуха за представленный период времени, °С, $T_{\rm min}$ – минимальная температура воздуха за представленный период времени, °С, $T_{\rm min}$ – минимальная температура воздуха за представленный период времени, °С, $W_{\rm cp}$ – средние тепловыделения за представленный период времени, кВт, dT/dt – средняя скорость снижения температуры воздуха за ремонтную смену, °С/мин.

eISSN 2500-0632

https://mst.misis.ru/



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Perestoronin M. O. et al. Experimental study of transient thermal conditions in longwall faces

При продолжительной остановке добычного оборудования в течение полноценной ремонтной смены с сохранением добычного режима проветривания столба лавы воздух в начале выработки, согласно результатам температурной съемки лавы № 1, успевает охладиться до температуры 29,1 °С, после чего вновь испытывает нагрев вплоть до 38,5 °С в добычные смены. В свою очередь, при продолжительной остановке добычного оборудования в течение полноценной ремонтной смены с уменьшением количества воздуха, подаваемого на проветривание лавы, воздух в начале выработки успевает охладиться лишь до температуры 30,0 °С.

В районе сопряжения лавы с конвейерным штреком температура воздуха вблизи кровли выработки на 1,3–1,5 °С выше, чем его температура вблизи почвы. Это объясняется: неравномерным нагревом потока воздуха от оборудования энергопоезда лавного комбайна, особенностями движения воздуха вблизи резких поворотов, которое заключается в разделении потока и образовании зон завихрения, а также разностью плотностей разных воздушных масс, поступающих в лаву, как со стороны нагретого оборудования, так и со стороны выработанного пространства. Выравнивание температуры воздуха в плоскости поперечного сечения лавы происходит на удалении 20 м от сопряжения лавы с конвейерным штреком. Фиксирование наиболее неблагоприятных температур воздуха в лаве произведено термодатчиком, установленным в очистном забое в начале лавы в районе четвертой секции механизированной крепи. Средние температуры воздуха, проходящего через данный участок лавы, оказались ниже замеренных и в момент проведения исследования изменялись от 27,7 до 37,1 °С.

Изменение температуры воздуха в лаве в исследуемых режимах вблизи вентиляционного штрека № 1 (в районе 124-й секции крепи) происходит в пределах от 23,4 до 26,4 °С. Как видно из температурных трендов, представленных на рис. 4, динамики температур воздуха для начала (4-я секция крепи) и конца (124-я секция крепи) лавы сопоставимы между собой с учетом работы добычного оборудования. Для оценки интенсивности тепловых процессов, протекающих в лаве, разработана одномерная модель конвективного переноса теплоты в лаве с учетом теплообмена с окружающими источниками. С помощью модели получена формула, связывающая температуру воздуха в конце горной выработки с температурой воздуха в ее начале, температурой породного массива, расходом и геометрическими параметрами горной выработки [19]. Эта формула имеет вид:

$$T_{\rm K} = T_{\rm \Pi} + \left(T_{\rm H} - T_{\rm \Pi}\right) e^{-\frac{KPL}{c\rho Q}},\tag{2}$$

где $T_{\rm K}$, $T_{\rm H}$, $T_{\rm \Pi}$ – соответственно температуры воздуха в конце и начале горной выработки, температура непотревоженного породного массива, °C; K – коэффициент нестационарного теплообмена, кВт/(м² · °C); P, L – периметр и длина горной выработки, м; c – массовая теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °C); ρ – плотность воздуха, кг/м³; Q – расход воздуха в горной выработке, м³/с.

Среднее значение коэффициента нестационарного теплообмена для лавы № 1, определенное по формуле (2) на основании экспериментальных данных, в период выполнения обследования составляло 4,21 Вт/(м² · °С), что говорит о значительной интенсивности процесса теплообмена между рудничным воздухом и горными породами³ [20].

Снижение температуры воздуха в исследуемые ремонтные смены можно условно разделить на два этапа (рис. 5).

Первый этап характеризуется резким снижением температуры воздуха за счет достаточно быстрого уменьшения мощности тепловыделения энергопоезда лавного комбайна, вызванного, во-первых, остановкой самого комбайна, во-вторых, продолжением работы вентилятора энергопоезда, концентрирующего поток воздуха на нагретом оборудовании на протяжении 5–10 мин. При этом снижение температуры

³ Справочное пособие к СНиП 2.01.55-85. Теплофизические расчеты объектов народного хозяйства, размещаемых в горных выработках. Москва Стройиздат: ЛГИ им. Г.В. Плеханова; 1989. 76 с.



Рис. 5. Этапы снижения температуры воздуха



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Пересторонин М. О. и др. Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов.

воздуха происходит по закону, близкому к линейному. Второй этап характеризуется плавным снижением температуры и подчиняется экспоненциальному закону, аналогичному зависимости (2):

$$T = T_0 + \Delta T e^{-at},\tag{3}$$

где T_0 – температура, к которой стремится воздух при охлаждении (минимальная температура, до которой охладится воздух), °C; ΔT – максимальная разница между T и T_0 , °C; a – параметр экспоненты, отвечающий за скорость снижения температуры, ч⁻¹; t – время, ч.

Вычисленные аппроксимирующие кривые (3) для эмпирической зависимости уравнения температуры воздуха от времени для исследуемых режимов проветривания лавы № 1 представлены на рис. 6. Анализ данных рис. 6 показывает, что для режимов 1–3 на всём временном промежутке экспериментальные кривые хорошо соответствуют экспоненциальному закону.

Для оценки скорости остывания оборудования введено характерное время, равное интервалу времени, за которое избыточная температура воздуха снизится в 2,71 раз (величина экспоненты). Таким образом, характерное время определяется по формуле:

$$\tau = \frac{1}{a}.$$
 (4)

Изменение температуры воздуха в ремонтные смены исследуемых режимов проветривания, а также значения характерного времени снижения избыточной температуры воздуха представлены в табл. 2.



Рис. 6. Аппроксимирующие кривые охлаждения воздуха в ремонтную смену для исследуемых режимов проветривания

44

https://mst.misis.ru/

Perestoronin M. O. et al. Experimental study of transient thermal conditions in longwall faces

2022;7(1):37-

Таблица 2 Изменение температуры воздуха в ремонтные смены исследуемых режимов

Температура воздуха при различных режимах	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Температура воздуха в начале ремонтной смены, °С	37,5	37,1	36,4	37,9
Температура воздуха сразу после отключения вентилятора энергопоезда, °С	34,7	34,9	32,6	35,0
Минимальная температура, до которой охла- дится воздух, °С	28,3	27,6	29,0	29,2
Характерное время снижения избыточной температуры воздуха	4 ч 46 мин	7 ч 41 мин	5 ч 0 мин	5 ч 0 мин

Кривые охлаждения, представленные на рис. 6, имеют разный характер остывания. Анализ первых двух исследуемых режимов проветривания, как режимов с постоянным расходом воздуха в ремонтную смену, показывает, что снижение расхода при переходе от добычной смены к ремонтной в значительной мере увеличивает скорость остывания оборудования. Так, в первом режиме при переходе с добычной на ремонтную смену и снижении расхода воздуха, вызванного отключением вентилятора энергопоезда, на 10,8 %, характерное время снижения избыточной температуры воздуха составляет 4 ч 46 мин. В свою очередь, во втором исследуемом режиме при снижении расхода воздуха на 33 % характерное время снижения избыточной температуры воздуха составляет 7 ч 41 мин.

Третий исследуемый режим характеризуется сравнительно длительными периодическими остановками оборудования в течение добычных смен и, как следствие, небольшими накопленными тепловыми мощностями. Существенное снижение расхода воздуха в ремонтную смену произошло через 1 ч 25 мин после окончания добычной смены. За это время значительная часть накопленного оборудованием тепла успела передаться воздуху. Данный режим проветривания нельзя считать показательным с точки зрения оценки зависимости динамики температур от подаваемого в ремонтную смену расхода воздуха.

Изменение расхода воздуха в ремонтную смену в четвертом исследуемом режиме происходило в три этапа:

 – снижение расхода на 11,5 % в связи с отключением вентилятора энергопоезда и фиксирование его на протяжении 1 ч;

 – снижение расхода на 41,1 % (относительно расхода в добычную смену) и фиксирование его на протяжении 2 ч 9 мин; – снижение расхода на 12,4 % (относительно расхода в добычную смену) и фиксирование его на протяжении 3 ч 29 мин.

Как видно из кривого охлаждения воздуха в ремонтную смену в четвертом исследуемом режиме, при снижении расхода воздуха, подаваемого на проветривание лавы, на 41,1 % происходит резкое снижение температуры воздуха в лаве, вызванное уменьшением количественной меры теплового потока, поступающего от нагретого оборудования лавного энергопоезда. Однако после увеличения расхода воздуха его температура в лаве резко увеличивается, принимая значения более высокие, чем они были бы без снижения расхода. Это вызвано тем, что скорость остывания оборудования снижается вследствие уменьшения количества омывающего его воздуха.

В целом отмечается, что скорость охлаждения воздуха в ремонтную смену вблизи нагретого оборудования тем выше, чем больше его температура по завершении добычной смены. Кроме этого, скорость охлаждения воздуха зависит от скорости движения воздуха, температуры естественного массива, площади поверхности теплообмена, которая определяется геометрией выработок и их конфигурацией, и энергоемкости оборудования.

Заключение

На основании результатов экспериментального исследования лавы № 1 первой северной панели горизонта –440 м рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий» сделаны следующие выводы.

Вентилятор энергопоезда не оказывает влияния на общее проветривание лавы, но обеспечивает локальное увеличение расхода воздуха в конвейерном штреке и усиливает поток, непосредственно омывающий оборудование энергопоезда лавного комбайна.

Основными «накопителями» теплоты в лаве в добычную смену являются: приконтурный массив, оборудование комбайнового комплекса и механизированная крепь лавы. После остановки добычи руды происходит их длительное остывание и постепенная передача накопленной теплоты в рудничную атмосферу в течение времени, значительно превышающего продолжительность ремонтной смены.

При длительной остановке добычного оборудования в течение полноценной ремонтной смены воздух в начале лавы успевает охладиться лишь до температуры 29–30 °С, после чего вновь испытывает нагрев вплоть до 38,5 °С в добычные смены. Температура воздуха в лаве вблизи вентиляционных выработок находится в допустимых пределах – от 23,4 до 26,4 °С. При этом динамики температур воздуха для начала и конца лавы сопоставимы между собой с учетом работы добычного оборудования.

Снижение температуры воздуха в лаве при остановке оборудования происходит в два этапа: резкое, близкое к линейному (за счет достаточно быстрого уменьшения мощности тепловыделения энергопоезда лавного комбайна, вызванного остановкой комбайна и продолжением работы вентилятора энергопоезда на протяжении 5–10 мин), затем – плавное, Пересторонин М. О. и др. Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов.



по экспоненциальному закону. При этом снижение подачи воздуха в ремонтную смену на 33 % приводит к увеличению характерного времени снижения избыточной температуры воздуха на 61 % – с 4 ч 46 мин до 7 ч 41 мин.

Таким образом, продолжение тепловыделений от разогретых элементов оборудования и массива обуславливает необходимость подачи воздуха в лаву в ремонтную смену в том количестве, которое подавалось в добычную смену. Это необходимо для отвода избыточной теплоты от техногенных источников тепловыделений, выключенных в начале ремонтной смены, но не успевших остыть. Указанную особенность техногенных источников тепловыделений необходимо учитывать при разработке технических решений по управлению проветриванием лав.

Предполагается, что результаты проведенного экспериментального исследования выступят исходными данными для разработки математической модели расчета теплообменных процессов в горных выработках, учитывающей нестационарную природу техногенных источников тепловыделений.

Список литературы

1. Гендлер С.Г. Тепловой режим подземных сооружений. Л.: ЛГИ им. Г.В. Плеханова; 1987. 102 с.

2. Зайцев А.В. *Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников*. [Дисс. д-р техн. наук]. Пермь; 2019. 247 с.

3. Чеботарёв А.Г., Афанасьева Р.Ф. Физиолого-гигиеническая оценка микроклимата на рабочих местах в шахтах и карьерах и меры профилактики его неблагоприятного воздействия. *Горная промышленность*. 2012;(6):34–40. URL: https://mining-media.ru/ru/article/prombez/3190-fiziologogigienicheskaya-otsenka-mikroklimata-na-rabochikh-mestakh-v-shakhtakh-i-karerakh-i-mery-profilaktikiego-neblagopriyatnogo-vozdejstviya.%20%D0%94%D0%B0%D1%82%D0%B0%20%D0%BE%D0%B1%D1%80 %D0%B0%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%2003.10.2018

4. Лапшин А.А. Влияние твердеющей закладки в очистных камерах на микроклимат глубоких шахт. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014;(10):3–11. URL: http://journals.uran.ua/ eejet/article/view/22151/21021

5. Галушко В.Н., Алферова Т.В., Алферов А.А. Определение показателей надёжности электрических систем с учетом изменяющихся условий эксплуатации. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого.* 2013;(3):80–87. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-pokazateley-nadezhnosti-elektricheskih-sistem-s-uchetom-izmenyayuschihsya-usloviy-ekspluatatsii

6. Венгеров И.Р. Том I. Анализ парадигмы. В: *Теплофизика шахт и рудников*. *Математические модели*. Донецк: Норд–Пресс; 2008. 632 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-teplofizika-shahti-rudnikov-matematicheskie-modeli-tom-1-analiz-paradigmy.pdf

7. Хохолов Ю.А., Курилко А.С. Математическое моделирование процессов тепломассообмена вентиляционого воздуха с горными породами в протяженных выработках шихт и рудников криолитозоны. *Наука и образование*. 2015;(3):50–54. URL: http://no.ysn.ru/attachments/article/1521/050-054_%D0%A5%D 0%BE%D0%BE%D0%BE%D0%BE%D0%B2.pdf

8. Лапшин А.А. Математическое моделирование теплообменных процессов при движении воздуха в горных выработках шахт. *Научный вестник Московского государственного горного университета*. 2013;(12):93–101. URL: https://readera.org/read/140215704

9. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(2):154–161. (Пер. вер.: Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Journal of Mining Science*. 2014;50(2):371–378. https://doi.org/10.1134/S1062739114020203)

10. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways. *International Journal of Mining and Geological Engineering*. 1986;4(3):165–195. https://doi.org/10.1007/BF01560715

11. Лапшин А.А. Математическое моделирование процессов нормализации микроклимата в глубоких рудных шахтах. *Науковий Вісник Національного Гірничого університету*. 2014;(3):137–144. URL: http://nvngu.in.ua/index.php/ru/component/jdownloads/finish/41-03/643-2014-3-lapshin/0

12. Minchev D.S., Gogorenko O.A. Effect of thermal on diesel engines transient performance. *Internal Combustion Engines*. 2020;(1):68–72. https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.09

13. Шувалов Ю.В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: Ресурсосберегающие системы. Л.: Изд-во Ленинградского университета; 1988. 196 с.

14. Луговский С.И. Проветривание глубоких рудников. Госгортехиздат; 1962. 324 с.

15. Rutherford J.G. Ventilation heat exchanger at Inco's Greighton Mine. *Canadian Mining Journal*. 1958;79(10):97–100.

16. Barenbrug A.W. Deep level mining. Observations on the Kolar Field. *The South African Mining and Engineering Journal*. 1948:2886.

17. Caw J.M. The Colar Gold Field. *Mine and Quarry Engineering*. 1956;22(7):238–296.

MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA)

2022;7(1):37-48

18. McPherson M.J. The simulation of airflow and temperature in the stopes of S. African gold mines. In: Proc. International Mine Ventilation Congress. Johannesburg; 1975. Pp. 35–51.

19. Ожегин М.А. Исследование тепловыделений от горных машин с электрическими приводами при ведении горных работ на большой глубине и их влияние на тепловой режим для условий четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий». В: Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. Пермь, 7-9 ноября 2018 г. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета; 2018. С. 358-360. URL: https://neftteh.ru/files/2018 1.pdf

20. Подвигин К.А. Анализ источников тепловыделения глубоких горизонтов угольных шахт. В: Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. Донецк, 26–28 мая 2020 г. Донецк: Донецкий национальный технический университет; 2020. С. 60–75. URL: http://ipd.donntu.org/dl/IPD2020/s1.pdf

References

1. Gendler S.G. Thermal conditions of underground structures. Leningrad: G.V. Plekhanov LGI; 1987, 102 p. (In Russ.)

2. Zaytsev A.V. Scientific bases of thermal management and calculations in underground mines. Doctoral thesis in engineering science. Perm; 2019. 247 p. (In Russ.)

3. Chebotarev A.G., Afanasieva R.F. Assessment of physiological and sanitary aspects of microclimate at workplaces in underground and opencast mines, and preventive measures against its adverse effect. Russian Mining Industry. 2012;(6):34-40. (In Russ.). URL: https://mining-media.ru/ru/article/prombez/3190-fiziologogigienicheskaya-otsenka-mikroklimata-na-rabochikh-mestakh-v-shakhtakh-i-karerakh-i-mery-profilaktikiego-neblagopriyatnogo-vozdejstviya.%20%D0%94%D0%B0%D1%82%D0%B0%20%D0%BE%D0%B1%D1%80 %D0%B0%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%2003.10.2018

4. Lapshin A.A. Influence of extraction chambers backfilling on microclimat of deep mines. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014;(10):3–11. (In Russ.). URL: http://journals.uran.ua/eejet/ article/view/22151/21021

5. Galushko V.N., Alferova T.V., Alferov A.A. Determination of reliability indicators of electrical systems taking into account changing operating conditions. Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. P.O. Sukhogo, 2013:(3):80–87. (In Russ.)

6. Vengerov I.R. Vol. I. Paradigm analysis. In: Thermophysics of Underground Mines and Open Pits. Mathematical Models. Donetsk: Nord-Press Publ.; 2008. 632 p. (In Russ.). URL: https://www.geokniga.org/ bookfiles/geokniga-teplofizika-shaht-i-rudnikov-matematicheskie-modeli-tom-1-analiz-paradigmy.pdf

7. Khokholov Yu.A., Kurilko A.S. Mathematical modelling of processes of heat mass exchange of ventilation air and rocks in the cryolithozone extensive mine workings. Nauka i Obrazovanie. 2015;(3):50-54. (In Russ.). URL: http://no.ysn.ru/attachments/article/1521/050-054 %D0%A5%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0 %BB%D0%BE%D0%B2.pdf

8. Lapshin A.A. Mathematical modeling of heat exchange processes at the movement of air in mine workings of ore mines. Nachnyi Vestnik MSMU. 2013;(12):93-101. (In Russ.). URL: https://readera.org/ read/140215704

9. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. Journal of Mining Science. 2014;50(2):371–378. https://doi.org/10.1134/S1062739114020203 (Orig. ver.: Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. Fiziko-Texhnicheskiye Problemy Razrabbotki Poleznykh Iskopaemykh. 2014;(2):154–161. (In Russ.))

10. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways. International Journal of Mining and Geological Engineering, 1986;4(3):165–195. https://doi.org/10.1007/BF01560715

11. Lapshin A.A. Mathematical simulation of microclimate normalisation processes in deep ore mines. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2014;(3):137–144. (In Russ.). URL: http://nyngu.in.ua/ index.php/ru/component/jdownloads/finish/41-03/643-2014-3-lapshin/0

12. Minchev D.S., Gogorenko O.A. Effect of thermal on diesel engines transient performance. Internal Combustion Engines. 2020;(1):68-72. https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.09

13. Shuvalov Yu.V. Thermal conditions control for underground mines and open pits in the North: Resourcesaving systems. Leningrad: Publishing House of Leningrad University; 1988. 196 p. (In Russ.)

14. Lugovsky S.I. Ventilation of deep mines. Gosgortekhizdat Publ.; 1962. 324 p. (In Russ.)

15. Rutherford J.G. Ventilation heat Exchanger at Inco's Greighton Mine. Canadian Mining Journal. 1958;79(10):97-100.

16. Barenbrug A.W. Deep level mining. Observations on the Kolar Field. The South African Mining and Engineering Journal. 1948:2886.

17. Caw J.M. The Colar Gold Field. Mine and Quarry Engineering. 1956;22(7):238–296.

https://mst.misis.ru/



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Пересторонин М. О. и др. Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов.

18. McPherson M.J. The simulation of airflow and temperature in the stopes of S. African gold mines. In: *Proc. International Mine Ventilation Congress.* Johannesburg; 1975. Pp. 35–51.

19. Ozhegin M.A. Study of electric driven mining machines heat release in deep underground mining conditions and its effect on the thermal conditions at the 4th Mine Administration of JSC "Belaruskali". In: *Problems of Hydrocarbon and Ore Mineral Deposits Development. Proceedings of the XI All-Russian Research-to-Practice Conference*. Perm, November 7–9. 2018. Perm: Perm National Research Polytechnic University Publ.; 2018. Pp. 358–360 (In Russ.).URL: https://neftteh.ru/files/2018_1.pdf

20. Podvigin K.A. Analysis of heat release sources at deep levels of coal mines. Innovative prospects of Donbass. In: *Proceedings of the 6th International Research-to-Practice Conference*. Donetsk: May 26–28. 2020. Donetsk: Donetsk National Technical University Publ.; 2020. Pp. 60–75. (In Russ.). URL: http://ipd.donntu.org/dl/IPD2020/s1.pdf

Информация об авторах

Максим Олегович Пересторонин – горный инженер, сектор Горной теплофизики, отдел Аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; e-mail per.maks1m.97@gmail.com

Артем Вячеславович Зайцев – доктор технических наук, заведующий сектором Горной теплофизики, отдел Аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID 57213120380; e-mail aerolog.artem@gmail.com

Михаил Александрович Семин – кандидат технических наук, научный сотрудник, сектор Горной теплофизики, отдел Аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-5200-7931, Scopus ID 56462570900, ResearcherID S-8980-2016; e-mail seminma@inbox.ru

Дмитрий Алексеевич Бородавкин – горный инженер, сектор Горной теплофизики, отдел Аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; e-mail borodavkin.dmitriy@gmail.com

Information about the authors

Maxim O. Perestoronin – Mining Engineer, Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; e-mail per.maks1m.97@gmail.com

Artem V. Zaitsev – Dr. Sci. (Eng.), the Head of the Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; Scopus ID 57213120380; e-mail aerolog.artem@gmail.com

Mikhail A. Semin – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0001-5200-7931, Scopus ID 56462570900, ResearcherID S-8980-2016; e-mail seminma@inbox.ru

Dmitry A. Borodavkin – Mining Engineer, Sector "Mining Thermal Physics", Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; e-mail borodavkin.dmitriy@gmail.com

Поступила в редакцию	18.10.2021	Received	18.10.2021
Поступила после рецензирования	11.11.2021	Revised	11.11.2021
Принята к публикации	01.02.2022	Accepted	01.02.2022