

# РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.411

DOI:10.7242/echo.2021.2.15

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА В ЛАВЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА

А.В. Зайцев, М.О. Пересторонин, А.В. Пугин  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе приводятся результаты экспериментального исследования формирования микроклимата лавы № 1 первой северной панели горизонта –440 м рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». Исследуются: изменение количества воздуха в столбе лавы при его движении от воздухоподающих выработок до очистного забоя, влияние количества воздуха, омывающего оборудование, на скорость остывания последнего, а также изменение температуры воздуха в лаве с течением времени при работающем и отключенном оборудовании. Результаты проведенного исследования будут использованы при разработке математической модели расчета теплообменных процессов в горных выработках.

**Ключевые слова:** лава, проветривание, рудничный микроклимат, тепловыделения, экспериментальное исследование.

### Введение

Сегодня предприятие ОАО «Беларуськалий», являющееся одним из крупнейших соледобытчиков в мире, углубляет фронт ведения горных работ и потому сталкивается с проблемой превышения допустимой температуры воздуха (+26 °С) в рабочих зонах. Такое превышение отрицательно сказывается на самочувствии горнорабочих [1, 2], а в критических случаях негативно влияет и на оборудование, провоцируя его перегрев, вынужденные отключения и чрезмерный износ [3]. Поэтому исследования, связанные с изучением микроклимата «проблемных» рабочих зон, являются особенно актуальными.

При текущем уровне развития информационных технологий наиболее совершенным способом исследования теплообменных процессов в горных выработках считается математическое моделирование процессов тепло-, влаго- и воздухораспределения в шахтной сети [4–7]. Предполагается, что параметризация математических моделей должна проводиться с использованием экспериментальных и лабораторных исследований. Существующие модели [8–11] выполнены в упрощенной форме и способны учитывать только теплообмен между воздухом и массивом, при этом воспринимая техногенные источники тепловыделений (горные машины и оборудование) только в режимах «работы» или «останова», когда выделения тепла максимальны или равны нулю, соответственно.

Для создания корректной теплофизической модели, которая способна учитывать остаточные тепловыделения от нагретого оборудования при его отключении, необходима хорошая экспериментальная база в виде результатов натурных исследований микроклимата рабочих зон при разных режимах работы оборудования и разных параметрах проветривания.

Целью данной работы ставится экспериментальное исследование влияния количества воздуха, подаваемого в рабочую зону лавы, на формирование её микроклимата. Объектом исследования выступает 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) оценка распределения воздуха в столбе лавы;
- 2) оценка влияния вентилятора энергопоезда на скорость остывания оборудования;
- 3) оценка изменения температуры воздуха вблизи оборудования при его работе и остановках с течением времени;
- 4) оценка распределения температуры воздуха по длине лавы с течением времени.

### Краткая характеристика объекта исследования

В общем случае лавы на рудниках «Беларуськалия» проветриваются согласно схеме, представленной на рис. 1. При этом свежая струя воздуха поступает в очистной забой с главных выработок направления через конвейерный и транспортный штреки, а исходящая – удаляется по вентиляционным штрекам.

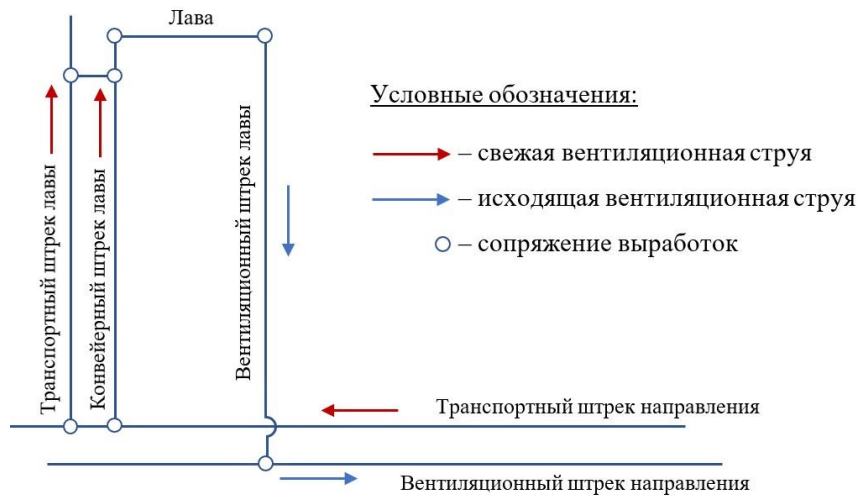


Рис. 1. Принципиальная схема проветривания лавы

Проветривание лавы № 1 осуществляется посредством общешахтной депрессии за счет работы главных вентиляторных установок рудника. Также вспомогательное воздействие на проветривание лавы оказывают вентиляторы местного проветривания, один из которых (Korfmann) установлен на конвейерном штреке вблизи его сопряжения с лавой и входит в состав энергопоезда комбайна, а второй (ВМ-12) – на вентиляционном штреке лавы вблизи его сопряжения со штреком направления и выполнен в самостоятельном исполнении.

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

Энергопоезд комбайна представляет собой платформу длиной около 120 м, на которой установлено вспомогательное оборудование добычного комбайна: станция управления, насосные станции, насосная установка, местный вентилятор, теплообменный аппарат и т.д. Энергопоезд располагается в конвейерном штреке на сопряжении его с лавой. Сам же добычной комбайн располагается в очистной выработке. В состав комбайнового комплекса, помимо комбайна и энергопоезда, входят: забойный скребковый конвейер, механизированная крепь и крепь сопряжения.

Основные тепловыделения от работы оборудования комбайнового комплекса отводятся в конвейерный штрек, после чего потоком воздуха переносятся в очистную выработку, тем самым способствуя возникновению в лаве высоких температур воздуха.

Стандартный график ведения работ на рудниках «Беларуськалия» включает в себя ежедневно четыре смены (три добычные и одну ремонтную), продолжительностью 6 часов каждая. Зачастую полноценная ремонтная смена заменяется кратковременной ревизией оборудования с остановкой на 2–3 часа.

### Программа исследования

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

В ходе эксперимента исследовалось четыре режима проветривания:

- 1) режим № 1 – расход воздуха в лаве для добычной и ремонтной смен одинаковый;
- 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 осуществлялись постоянно температурно-влажностными датчиками Kestrel, установленными в лаве на сопряжениях с конвейерным и вентиляционным штреками, и периодически термовлагомером Fluke 971. Измерение параметров проветривания производилось анемометром АПР-2.

### Результаты исследования

Исследование системы проветривания лавы № 1 показало, что из очистного забоя исходит на 19% 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 этом расход исходящего с лавы воздуха остается одинаковым для добычной и ремонтной смен. Таким образом, вентилятор энергопоезда не оказывает влияния на общее проветривание лавы, но обеспечивает локальное увеличение расхода в конвейерном штреке примерно на 12,4%.

Результаты измерений температуры воздуха в рабочей зоне лавы № 1 температурно-влажностными датчиками приведены на рис. 2. Показания датчиков контролировались замами термовлагомером.

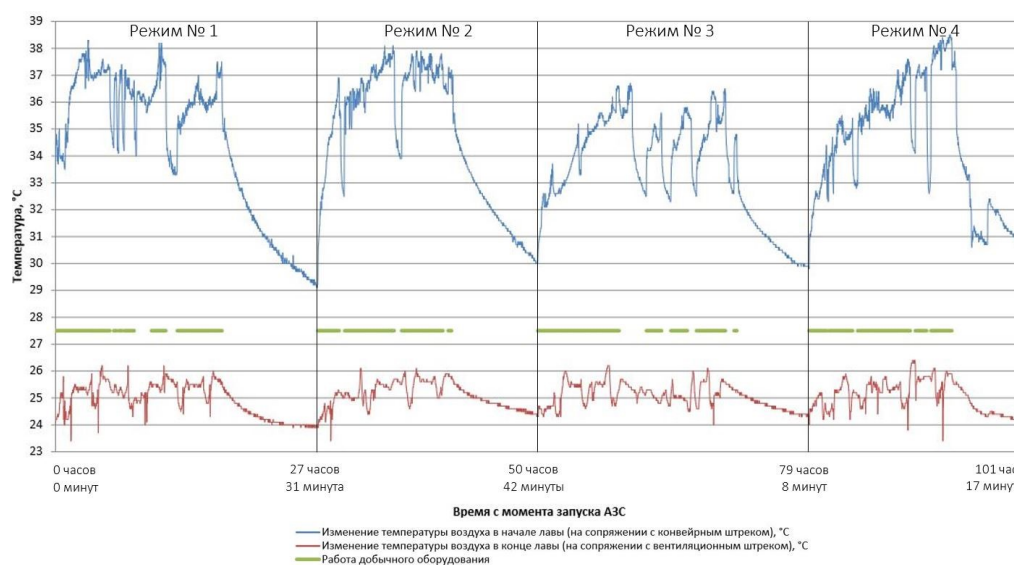


Рис. 2. Изменения температуры воздуха, регистрируемые температурно-влажностными датчиками, установленными в лаве № 1

Температура воздуха, поступающего на проветривание лавы, равна 25,6°С.

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

Таблица 1

Результаты температурной съемки лавы № 1

		Вентилятор энергопоезда	Q, м <sup>3</sup> /с	Длительность	T <sub>max</sub> , °С	T <sub>min</sub> , °С	W <sub>cp</sub> , кВт	V <sub>cp</sub> , °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	0,013
Режим 2	Д	включен	7,54	14 ч 9 мин	38,1		100,7	
	Р	отключен	5,05	9 ч 2 мин	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
	Р	отключен	4,97	6 ч 10 мин	31,7	29,8	31,2	0,005
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	33,9	30,6	36,3	0,026
	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 (м<sup>3</sup>/с), T<sub>max</sub> – максимальная температура воздуха за представленный период времени (°С), T<sub>min</sub> – минимальная температура воздуха за представленный период времени (°С), W<sub>cp</sub> – средние тепловыделения за представленный период времени (кВт), V<sub>cp</sub> – средняя скорость снижения температуры воздуха за ремонтную смену (°С/мин).

Как видно из температурных трендов, представленных на рис. 2, динамики температур воздуха для начала и конца лавы сопоставимы между собой с учетом работы добычного оборудования.

Снижение температуры воздуха в исследуемые ремонтные смены происходит в два этапа. Первый этап характеризуется резким, практически линейным снижением температуры за счет достаточно быстрого уменьшения мощности тепловыделения энергопоезда лавного комбайна, вызванного, во-первых, остановкой самого комбайна, во-вторых, продолжением работы вентилятора энергопоезда. Второй этап, в свою очередь, характеризуется плавным снижением температуры и подчиняется экспоненциальному закону следующего вида:

$$T = T_0 + \Delta T \cdot e^{-a \cdot t}, \tag{1}$$

где T<sub>0</sub> – температура, к которой стремится воздух при охлаждении (минимальная температура, до которой охладится воздух), °С; ΔT – максимальная разница между T и T<sub>0</sub>, °С; a – параметр экспоненты, отвечающий за характер снижения температуры, ч<sup>-1</sup>; t – время, ч.

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

$$\tau = \frac{1}{a}. \quad (2)$$

Кривые охлаждения воздуха для исследуемых режимов проветривания лавы № 1 представлены на рис. 3.

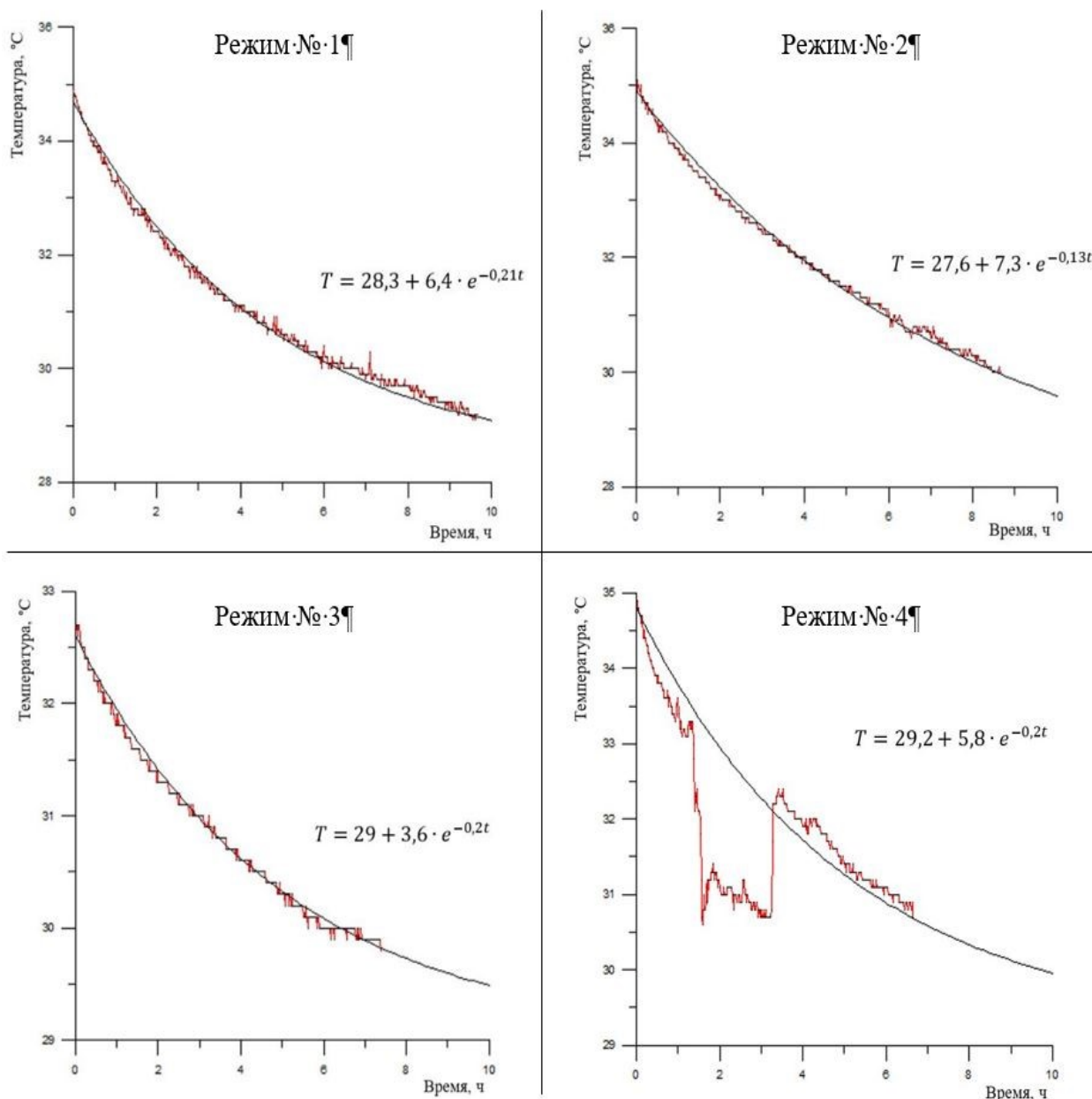


Рис. 3. Кривые охлаждения воздуха в ремонтную смену для исследуемых режимов проветривания

Изменение температуры воздуха в ремонтные смены исследуемых режимов проветривания представлено в таблице 2.

Таблица 2

Изменение температуры воздуха в ремонтные смены исследуемых режимов

	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 охладится воздух, °С	28,3	27,6	29,0	29,2
Время, за которое температура воздуха снизится в 2,71 раз	4 ч 46 мин	7 ч 41 мин	5 ч 0 мин	5 ч 0 мин

Кривые охлаждения, представленные на рис. 3, имеют разный характер остывания. Анализ первых двух исследуемых режимов проветривания, как режимов с постоянным расходом воздуха в ремонтную смену, показывает, что снижение расхода в ремонтную смену 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 остывания составляет 4 часа 46 минут. В свою очередь, во втором исследуемом режиме при снижении расхода воздуха на 33% характерное время остывания составляет 7 часов 41 минуту.

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 час 25 минут 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 часа;
- снижение расхода на 41,1% (относительно расхода в добычную смену) и фиксирование его на протяжении 2 часов 9 минут;
- снижение расхода на 12,4% (относительно расхода в добычную смену) и фиксирование его на протяжении 3 часов 29 минут.

Как видно из кривой 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 тем больше, чем выше его температура в начале ремонтной смены. Также она зависит от температуры естественного массива, поверхности теплообмена, которая определяется геометрией выработок и их конфигурацией, и энергоёмкости оборудования. Снижение расхода воздуха в ремонтную смену неуклонно ведет к ухудшению микроклиматических условий в рабочей зоне лавы.

### **Выводы**

Исследование формирования микроклимата лавы при изменении количества воздуха, подаваемого на ее проветривание, в периоды работы и остановки оборудования показали, что снижение расхода воздуха в ремонтную смену неуклонно ведет к ухудшению микроклиматических условий рабочей зоны лавы и увеличению скорости остывания оборудования.

Для продолжения исследования формирования микроклимата лавы требуется разработать математическую модель, учитывающую нестационарные источники тепловыделений в виде оборудования комбайнового комплекса. Даная цель и связанные с ней задачи будут решены в продолжении этого исследования.

*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. 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 (106). – С. 34–40.
2. Лапшин А.А. Влияние твердеющей закладки в очистных камерах на микроклимат глубоких шахт // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 10 (68). – С. 3–11.
3. Галушко В.Н., Алферова Т.В., Алферов А.А. Определение показателей надёжности электрических систем с учетом изменяющихся условий эксплуатации // Вестник Гомельского гос. технич. ун-та им. П.О. Сухого. – 2013. – № 3 (54). – С. 80–87.
4. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ...д.т.н.; 25.00.20: защищена 23.05.19 / Зайцев Артем Вячеславович. – Пермь, 2019. – 247 с.
5. Лапшин А.А. Математическое моделирование теплообменных процессов при движении воздуха в горных выработках рудных шахт // Науч. вестн. Московского гос. горного ун-та. – 2013. – № 12. – С. 93–101.
6. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 632 с.
7. Хохлов Ю.А., Курилко А.С. Математическое моделирование процессов тепломассообмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных выработках шахт и рудников криолитозоны // Наука и образование. – 2015. – № 3 (79). – С. 50–54.
8. 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. – С. 154–161.
9. Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Шалимов А.В., Зайцев А.В. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ // Записки Горного института. – 2017. – Т. 223. – С. 116–124.
10. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways // International Journal of Mining and Geological Engineering. – 1986. – V. 4, № 3. – P. 165–195.
11. Xin S., Wang W., Zhang N., Zhang C., Yuan S., Li H., Yang W. Comparative studies on control of thermal environment in development headings using force/exhaust overlap ventilation systems // Journal of Building Engineering. – 2021. – T. 38. – Номер статьи 102227. – DOI: 10.1016/j.jobee.2021.102227.