

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В УСЛОВИЯХ РАБОЧИХ ЗОН ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ

Д.В. Ольховский¹, А.В. Зайцев¹, М.А. Семин¹

¹ Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: arc@mi-perm.ru

Аннотация: Одним из неблагоприятных аэрологических факторов при ведении горных работ на больших глубинах является высокая температура воздуха в горных выработках. Для обеспечения допустимых по правилам безопасности температур воздуха в горных выработках таких рудников возникает необходимость применения средств нормализации микроклимата. В наиболее неблагоприятных тепловых условиях применяются системы кондиционирования воздуха, корректное проектирование которых для рабочих зон на больших глубинах сопряжено с рядом дополнительных факторов. Помимо роста температуры воздуха, с глубиной растет его барометрическое давление, в связи с чем изменяются такие важные для определения холодопроизводительности воздухоохладителей системы кондиционирования воздуха параметры, как максимальное влагосодержание воздуха и его плотность. Цель работы – выполнить количественный анализ влияния указанных физических особенностей, вызванных ростом барометрического давления воздуха с глубиной, на рассчитываемую величину холодопроизводительности подземной системы кондиционирования воздуха. Исследовано влияние уменьшения максимального влагосодержания воздуха на требуемую холодопроизводительность воздухоохладителей при одинаковой температуре и растущем барометрическом давлении с глубиной. Определено, что с ростом глубины растут температура мокрого термометра и температура точки росы. Показано, что из-за роста температуры мокрого термометра с глубиной ухудшается работа камер орошения. Показано, что на требуемую холодопроизводительность воздухоохладителей с ростом глубины влияет изменение плотности воздуха и максимального влагосодержания. Выполнена оценка роста требуемой холодопроизводительности воздухоохладителей в зависимости от обоих факторов и построены графики увеличения холодопроизводительности от глубины. Обнаружено, что при определенных условиях требуемая холодопроизводительность воздухоохладителей может возрасти в несколько раз. Основным фактором роста является изменение максимального влагосодержания воздуха. Сделаны выводы о причинах существенного роста холодопроизводительности воздухоохладителей.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, воздухоохладитель, i-d-диаграмма, конденсация влаги, барометрическое давление, глубокий рудник, температура точки росы.

Благодарность: 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.

Для цитирования: Ольховский Д. В., Зайцев А. В., Семин М. А. Анализ изменения холодопроизводительности систем кондиционирования воздуха в условиях рабочих зон глубоких рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12. – С. 110–119. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_110.

Variation of cooling efficiency of air conditioning systems in working spaces of deep mines

D.V. Olkhovskiy¹, A.V. Zaitsev¹, M.A. Semin¹

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: arc@mi-perm.ru

Abstract: One of the unfavorable aerological factors in deep-level mining is the high air temperature. The safe air temperature conditions in such mines are achievable using the microclimate normalization equipment. In the most adverse heat conditions, it is required to correctly design air conditioning systems for the working spaces in deep mines. The air temperature and barometric pressure grow with increasing depth, which induces the change in the moisture content and density of air, which are important for the assessment of cooling efficiency of the air conditioning systems. This study aims at the quantitative analysis of the effect exerted by these physical peculiarities induced by the increasing barometric pressure of air with depth on the cooling efficiency of an underground mine air conditioning system. The influence of the decreased maximum moisture content of air on the required cooling efficiency of the air conditioning systems are the same temperature and growing barometric pressure of air with depth is investigated. It is found that the temperatures of the wet bulb thermometer and dew point grow with the increasing depth. The higher wet bulb thermometer temperature worsens operation of the irrigation cells. The cooling efficiency of air conditioners is affected by the change in the air density and maximum moisture content with the increasing depth. The required increase in the cooling efficiency of air conditioners is estimated, and the cooling efficiency–depth curves are plotted. It is found that the required cooling efficiency can go up several times given certain conditions. The main factor of such increase is the change in the maximum moisture content of air. The causes of the essential growth in the cooling efficiency of air conditions are discussed.

Key words: air conditioning system, air cooler, i–d diagram, moisture condensation, barometric pressure, deep mine, dew point temperature.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation within the framework of State Contract No. 075-03-2021-374 dated 29 December 2020.

For citation: Olkhovskiy D. V., Zaitsev A. V., Semin M. A. Variation of cooling efficiency of air conditioning systems in working spaces of deep mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12):110-119. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_110.

Введение

В настоящее время многие горнодобывающие предприятия для поддержания и увеличения своих производственных мощностей вынуждены вовлекать в отработку все более глубокие залежи полезных ископаемых [1], использовать более высокопроизводительную технику. По мере увеличения глубины веде-

ния горных работ температура окружающих пород растет. В этих условиях микроклиматические параметры в рабочих зонах шахт и рудников начинают превышать предельно допустимые значения [2–5], что неприемлемо с точки зрения правил безопасности [6]. Значимым фактором, способствующим превышению предельных значений микро-

климатических параметров в рабочих зонах рудников, является теплота, выделяющаяся при работе горной техники (погрузочно-доставочных машин, самосвалов и др.) [7–9]. Все чаще ставится вопрос о применении системы кондиционирования воздуха в подземных горных выработках рудников [3, 10], холодопроизводительность которых зависит от требуемой холодопроизводительности на воздухоохладителях. Холодопроизводительность на воздухоохладителе в свою очередь зависит от массы воздуха, проходящего через него, разницы температур воздуха, которую должен обеспечить воздухоохладитель, относительной влажности воздуха и температуры теплоносителя. С ростом глубины расположения воздухоохладителя меняется барометрическое давление воздуха, которое в свою очередь влияет на такие параметры, как плотность воздуха и его влагосодержание.

Изменение максимального влагосодержания в воздухе приводит к изменению температуры точки росы, что приводит к изменению объема конденсируемой влаги на воздухоохладителях, а это напрямую влияет на холодопроизводительность системы кондиционирования. Если влаги будет конденсироваться больше, то требуемая холодопроизводительность системы кондиционирования вырастет, если меньше, то ее требуемая мощность будет меньше. Чем больше глубина и выше барометрическое давление воздуха, тем сильнее изменяется максимальное влагосодержание в воздухе, а значит, меняется требуемая мощность системы кондиционирования.

Цель настоящей работы — количественный анализ влияния указанных физических особенностей, вызванных ростом барометрического давления воздуха с глубиной, на рассчитываемую величину холодопроизводительности воздухоохладителей подземной системы конди-

ционирования воздуха. Анализ выполнен на примере глубокого рудника, расположенного в Красноярском крае.

Изменение параметров влажного воздуха с ростом давления

Для определения холодопроизводительности воздухоохладителей систем кондиционирования воздуха используется формула:

$$Q_x = L \cdot \rho \cdot (i_{\text{нач}} - i_{\text{кон}}), \text{ кВт} \quad (1)$$

где L — расход воздуха, м³/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; $i_{\text{нач}}$ — энтальпия влажного воздуха перед воздухоохладителем, кДж/кг; $i_{\text{кон}}$ — энтальпия воздуха после воздухоохладителя, кДж/кг.

Расход воздуха (L) определяется расчетом требуемого количества воздуха и является константой. Плотность воздуха (ρ) определяется по формуле идеального газа:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot P_{\text{бар}}}{1013 \cdot (273 + T)}, \text{ кг/м}^3 \quad (2)$$

где $\rho_0 = 1,293$ кг/м³ — плотность воздуха при температуре 0 °С; $P_{\text{бар}}$ — барометрическое давление воздуха, гПа; T — температура воздуха, °С.

Барометрическое давление воздуха зависит от глубины [11] места установки воздухоохладителя и определяется по барометрической формуле:

$$P_{\text{бар}} = P_0 \cdot e^{\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot (T + 273,15)}}, \text{ кг/м}^3, \quad (3)$$

где P_0 — давление на уровне земли, кПа; $M = 0,029$ кг/моль — молярная масса воздуха; h — глубина выработки, м; $R = 8,31$ — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура воздуха на поверхности, °С; $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения [12, 13].

Так, при постоянной температуре воздуха плотность изменяется до глубины 2000 м практически линейно, на рис. 1 представлен график роста плотности от глубины в процентах.

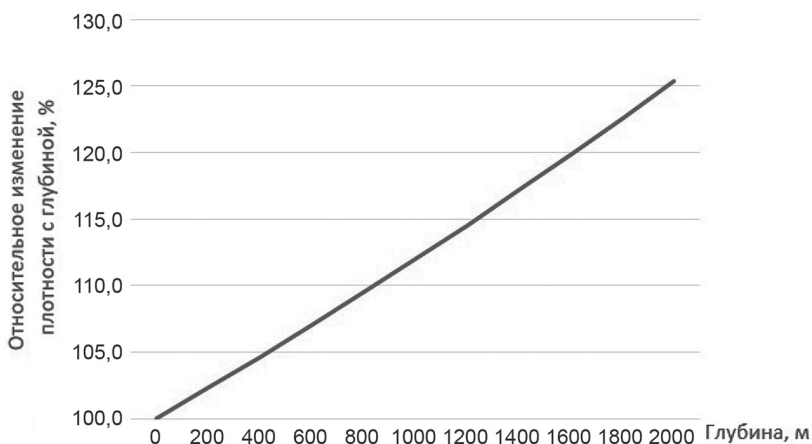


Рис. 1. График зависимости плотности воздуха от глубины

Fig. 1. Air density–depth curve

В результате только роста плотности воздуха мощность системы охлаждения может существенно увеличиться, так как рост плотности практически линеен на данных глубинах, то и рост производительности будет линеен. Результаты расчета зависимости требуемой холодопроизводительности воздухоохладителей от глубины по плотности воздуха сведены в таблицу.

Таким образом, для новых глубоких шахт стоимость поддержания допустимых температур обходится дороже не только за счет роста температуры окружающих пород, но и роста плотности воздуха.

Помимо изменения плотности воздуха, с ростом барометрического давления изменяются другие его свойства, такие как максимальное влагосодержание и вытекающие из этого температура

точки росы и температура мокрого термометра.

Согласно [14] максимальное влагосодержание влажного воздуха зависит от парциального давления насыщенного водяного пара и определяется по формуле:

$$d_{\max} = 621,98 \cdot \frac{P_H}{P_6 - P_H}, \text{ г/кг}, (4)$$

где P_H — парциальное давление насыщенного водяного пара, которое зависит только от температуры среды:

$$P_H = 0,6112 \cdot e^{\frac{\alpha \cdot t}{\beta + t}}, \text{ кПа}, (5)$$

где α и β — постоянные для воды, $\alpha = 17,504$, $\beta = 241,2$ °С; t — температура воздуха в °С.

Увеличение барометрического давления также влияет на температуру точки росы. Температура точки росы определяется по формуле:

Зависимость требуемой холодопроизводительности от глубины по плотности воздуха
Required cooling efficiency–depth correlation versus air density

Глубина, м	Рост холодопроизводительности, %
500	5,8
1000	12,0
1500	18,5
2000	25,4

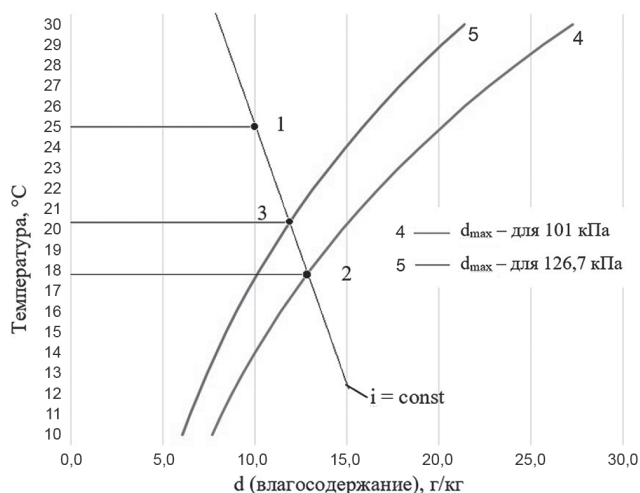


Рис. 2. Пример. Определение температуры мокрого термометра при разных значениях барометрического давления

Fig. 2. Example. Determination of wet bulb temperature at different barometric pressure values

$$T_{dp} = \frac{c \cdot \ln \frac{P_n}{a}}{b - \ln \frac{P_n}{a}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6)$$

где a , b , c — константы, $a = 0,6112$, $b = 17,504$, $c = 241,2$ °C; P_n — парциальное давление водяного пара.

При сжатии воздуха, имеющего относительную влажность меньше 100%, парциальное давление водяных паров растет пропорционально давлению всех газов в смеси и может быть определено по формуле (3). Согласно формуле (6) с ростом парциального давления температура точки росы также растет.

Увеличение температуры точки росы означает, что дефицит росы уменьшается. Дефицитом точки росы называют разницу между температурой воздуха и температурой точки росы. Уменьшение дефицита точки росы ведет к тому, что при охлаждении воздуха на глубине начала конденсации влаги происходит при более высоких температурах в воздухоохладителях чем на поверхности.

В случае применения для охлаждения воздуха камер орошения в глубоких рудниках крайне важно знать темпера-

туру мокрого термометра, которая так же, как и температура точки росы, возрастает. Для этого необходимо определить энтальпию влажного воздуха и относительную влажность [15–17]:

$$i = 1,006 \cdot t + (2501 + 1,805 \cdot t) \cdot d/1000, \text{ кДж/кг}, \quad (7)$$

где t — температура воздуха, °C; d — влагосодержание воздуха, г/кг.

$$\varphi = P_n / P_n \cdot 100, \text{ } \%, \quad (8)$$

где P_n — парциальное давление водяного пара, кПа; P_n — давление насыщенного пара, кПа.

Увеличение температуры мокрого термометра можно увидеть, построив линии максимального влагосодержания (100% относительной влажности) по формуле (4) для давлений 101 кПа и 126,7 кПа при одинаковой энтальпии, т.е. частично построив i - d диаграмму, также называемую диаграммой Рамзина и Мольте [18, 19], для разных давлений (см. рис. 2). Построение i - d диаграммы подробно описано в работах [20–22].

Для точки 1, соответствующей температуре 25 °C и влагосодержанию 10 г/кг,

температура мокрого термометра при давлении 101 кПа составит 17,9 °С (точка 2), а для давления 126,7 кПа 20,4 °С (точка 3).

Рост температуры мокрого термометра является существенным и может привести к значительному снижению эффективности камер орошения.

Как следствие, уменьшение максимального влагосодержания и увеличение температуры точки росы с глубиной при охлаждении воздуха с помощью воздухоохладителей системы кондиционирования воздуха ведет к более быстрому достижению температуры начала конденсации. Конденсация влаги из воздуха при охлаждении является негативным процессом, из-за которого необходимо затратить большую холодильную мощность, чем без нее.

Для того чтобы оценить влияние уменьшения максимального влагосодержания с ростом давления от глубины на холодопроизводительность воздухоохладителей были рассчитаны изменения энтальпий влажного воздуха при различной глубине и перепадах температур воздуха. Для этого определялось значение энтальпии по формуле (7) для начальной точки (т.к. температура и влагосодержа-

ние для нее принимались одинаковыми, ее значение постоянно) и конечной точки, значение которой меняется из-за изменения максимального влагосодержания в воздухе при заданной температуре и растущем барометрическом давлении. Изменение разницы между энтальпиями начальной и конечной точки от глубины в процентном соотношении показано на рис. 3. Влагосодержание начальных точек было подобрано таким образом, чтобы при охлаждении относительная влажность воздуха достигала 100%, это позволит получить прямую зависимость холодопроизводительности от выпадения большего количества влаги с ростом глубины.

По полученным данным можно сделать следующие выводы:

При меньших перепадах температур рост холодопроизводительности значительнее, чем при больших. Это объясняется тем, что при малых перепадах температур большую часть затрат на охлаждение составляет конденсация влаги, а на изменение теплосодержания воздуха — меньшую, при больших перепадах это соотношение смещается в сторону изменения теплосодержания, а влияние конденсации уменьшается;

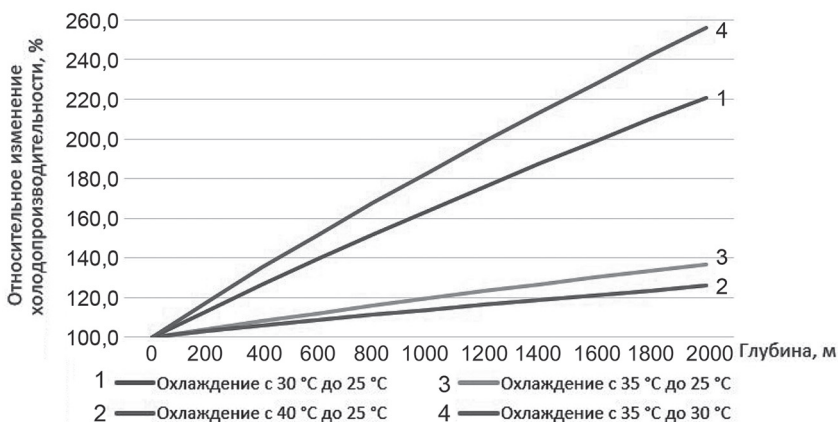


Рис. 3. График изменения требуемой холодопроизводительности на воздухоохладителе с ростом глубины

Fig. 3. Change in required cooling efficiency of air cooler with increasing depth

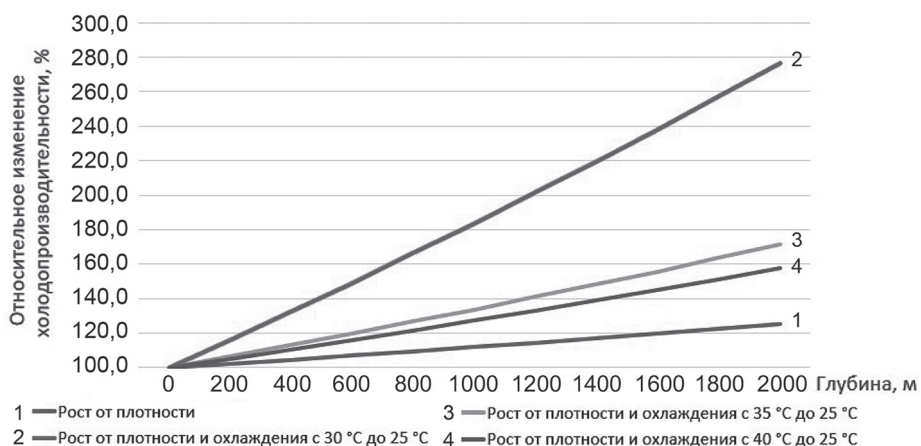


Рис. 4. График роста требуемой холодопроизводительности с глубиной
 Fig. 4. Required cooling efficiency–depth curve

При охлаждении воздуха с большей температурой, но при одинаковом перепаде температур, рост холодопроизводительности будет выше при охлаждении более горячего воздуха. Это объясняется тем, максимальное влагосодержание при росте температуры увеличивается экспоненциально, а значит, и разница энтальпий тоже.

Таким образом, помимо роста холодопроизводительности от роста плотности воздуха существует рост холодопроизводительности от более ранней конденсации влаги из воздуха из-за возросшей температуры точки росы. На рис. 3 представлены примеры наихудших вариантов, когда относительная влажность охлажденного воздуха равна 100% при всех значениях давления и глубины. При прочих случаях отрицательный эффект будет ниже. Как итог, рост реальной требуемой холодопроизводительности воздухоохладителя находится в диапазоне между значениями роста холодопроизводительности только от плотности воздуха (см. рис. 1) и значениями, учитывающими рост холодопроизводительности и от плотности воздуха, и от увеличения температуры точки росы с ростом барометрического давления

(рис. 4), ведущей к увеличению затрат холодопроизводительности на конденсацию большего объема влаги из воздуха.

В результате можно сделать вывод о том, что в зависимости от условий охлаждения воздуха требуемая холодопроизводительность воздухоохладителей, а следовательно, и холодильных машин, с глубиной может вырасти в несколько раз.

Выводы

Холодопроизводительность воздухоохладителей системы кондиционирования воздуха с ростом глубины при одном и том же состоянии воздуха (при постоянной температуре и влагосодержании) растет.

При небольшом перепаде температур воздуха на воздухоохладителе рост холодопроизводительности с глубиной является более существенным, т.к. при небольших перепадах температур, большую часть затрат на охлаждение составляет конденсация влаги, а на изменение температуры воздуха затраты меньше. При больших перепадах соотношение затрат холодопроизводительности смещается в сторону изменения температу-

ры, а влияние конденсации влаги уменьшается, в результате при большом перепаде температур на воздухоохладителе рост холодопроизводительности с глубиной значительно меньше.

При охлаждении воздуха в случае одинакового перепада температур на воздухоохладителе рост холодопроизводительности будет выше при охлаждении более горячего воздуха по причине того,

что максимальное влагосодержание с ростом температуры увеличивается экспоненциально, а значит, и разница энтальпий воздуха до и после воздухоохладителя тоже.

В случае применения камер орошения для охлаждения воздуха температура влажного термометра возрастает с увеличением глубины, что снижает эффективность их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuyuk A. F., Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F. P. Closed-loop bulk air conditioning. A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 511 – 516.

2. Алабьев В. Р., Новиков В. В., Пашиных Л. А., Бажина Т. П. Нормализация теплового режима протяженных тупиковых выработок при высоких температурах пород на основе шахтных передвижных кондиционеров // *Записки горного института*. – 2019. – № 237. – С. 251 – 258.

3. Pretorius J. G., Mathews M. J., Mare P., Kleingeld M., Rensburg J. Implementing a DIKW model on a deep mine cooling system // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, no. 2, pp. 319 – 326.

4. Qing Zheng, Ying Ke, Hongfu Wang Design and evaluation of cooling workwear for miners in hot underground mines using PCMs with different temperatures // *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2020, vol. 26, pp. 1 – 11.

5. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining / *The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition «Boom or Bust», The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2010, pp. 285 – 292.

6. Красноштейн А. Е., Казаков Б. П., Шалимов А. В. Моделирование процессов нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород // *ФТПРПИ*. – 2007. – № 5. – С. 77 – 85.

7. Казаков Б. П., Зайцев А. В. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких рудников // *Вестник ПНИПУ*. – 2014. – № 10. – С. 91 – 97.

8. Maurya T., Karena K., Vardhan H., Aruna M., Raj M. G. Potential sources of heat in underground mines – a review // *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015, vol. 11, pp. 463 – 468.

9. 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.

10. Галаов Р. Б., Бальчугов В. Г., Казаков Б. П., Бутаков С. В. Способ нормализации микроклиматических условий в выработках глубоких рудников // *Горный журнал*. – 2015. – № 6. – С. 89 – 92.

11. Мальцев С. В. Семин М. А., Кормщиков Д. С. Метод определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов медно-никелевых рудников // *ФТПРПИ*. – 2020. – № 6. – С. 170 – 178.

12. Кузнецов С. И. Молекулярная физика. Термодинамика. – Томск: ТПУ, 2006. – 104 с.

13. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020, vol. 20, article 100760. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100760.

14. Бурцев С. И., Цветков Ю. Н. Влажный воздух. Состав и свойства. — СПб.: СПбГАХПТ, 1998. — 146 с.
15. Тарабанов М. Г., Коркин В. Д., Сергеев В. Ф. Справочное пособие. АВОК 1-2004 «Влажный воздух». URL: <http://www.gosthelp.ru/text/AVOKSpravochnoeposobie120.html> (дата обращения 05.04.2021).
16. Ривкин С. Л., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. — М.: Энергия, 1980. — 84 с.
17. Ashrae Handbook. Fundamentals. Ashrae, Atlanta, 2001.
18. Казаков В. Г., Громова Е. Н. Расчет системы кондиционирования воздуха в производственном помещении. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. — 54 с.
19. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло- и массообмена. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 576 с.
20. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Высшая школа, 1971. — 460 с.
21. Богословский В. Н., Кокорин О. Я., Петров Л. В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. — М.: Стройиздат, 1985. — 367 с.
22. Стефанов Е. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. — Л.: ВВИТКУ, 1970. — 399 с. **ПАБ**

REFERENCES

1. Kuyuk A. F., Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F. P. Closed-loop bulk air conditioning. A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 511 – 516.
2. Alabyev V. R., Novikov V. V., Pashinyan L. A., Bazhina T. P. Normalization of thermal mode of extended blind workings operating at high temperatures based on mobile mine air conditioners. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 251 – 258. [In Russ].
3. Pretorius J. G., Mathews M. J., Mare P., Kleingeld M., Rensburg J. Implementing a DIKW model on a deep mine cooling system. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, no. 2, pp. 319 – 326.
4. Qing Zheng, Ying Ke, Hongfu Wang Design and evaluation of cooling workwear for miners in hot underground mines using PCMs with different temperatures. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2020, vol. 26, pp. 1 – 11.
5. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining. *The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition «Boom or Bust»*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010, pp. 285 – 292.
6. Krasnoshtein A. E., Kazakov B. P., Shalimov A. V. Modeling of the processes of non-stationary heat exchange between the mine air and the rock mass. *Fiziko-tekhicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2007, no. 5, pp. 77 – 85. [In Russ].
7. Kazakov B. P., Zaitsev A. V. Research of the processes of formation of the thermal regime of deep mines. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 10, pp. 91 – 97. [In Russ].
8. Maurya T., Karena K., Vardhan H., Aruna M., Raj M. G. Potential sources of heat in underground mines – a review. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015, vol. 11, pp. 463 – 468.
9. Karelín V. N., Kravchenko A. V., Levin L. Yu., Kazakov B. P., Zaitsev A. V. Features of the formation of microclimatic conditions in the mine workings of deep mines. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 6, pp. 65 – 68. [In Russ].
10. Galaov R. B., Balchugov V. G., Kazakov B. P., Butakov S. V. A method for normalizing microclimatic conditions in the workings of deep mines. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 6, pp. 89 – 92. [In Russ].
11. Malcev S. V., Semin S. A., Kormshikov D. S., Method for determining the aerodynamic drag coefficients of mine shafts of copper-nickel mines. *Fiziko-tekhicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2020, no. 6, pp. 170 – 178. [In Russ].

12. Kuznetsov S. I. *Molekulyarnaya fizika. Termodinamika* [Molecular physics. Thermodynamics], Tomsk, TPU, 2006, 104 p.
13. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020, vol. 20, article 100760. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100760.
14. Burtsev S. I., Tsvetkov Yu. N. *Vlazhnyy vozdukh. Sostav i svoystva* [Humid air. Composition and properties], Saint-Petersburg, SPbGAKHPT, 1998, 146 p.
15. Tarabanov M. G., Korkin V. D., Sergeev V. F. *Spravochnoe posobie. AVOK 1-2004 «Vlazhnyy vozdukh»*, available at: <http://www.gosthelp.ru/text/AVOKSpravochnoeposobie120.html> (accessed 05.04.2021).
16. Rivkin S. L., Aleksandrov A. A. *Teplofizicheskie svoystva vody i vodyanogo para* [Thermophysical properties of water and water vapor], Moscow, Energiya, 1980, 84 p.
17. *Ashrae Handbook. Fundamentals*. Ashrae, Atlanta, 2001.
18. Kazakov V. G., Gromova E. N. *Raschet sistemy konditsionirovaniya vozdukha v proizvodstvennom pomeshchenii* [Calculation of the air conditioning system in the production room], Saint-Petersburg, VSHTe SPbGUPTD, 2018, 54 p.
19. Ekkert E. R., Dreyk R. M. *Teoriya teplo- i massoobmena* [Theory of heat and mass transfer], Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1961, 576 p.
20. Nesterenko A. V. *Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha* [Fundamentals of thermodynamic calculations of ventilation and air conditioning], Moscow, Vysshaya shkola, 1971, 460 p.
21. Bogoslovskiy V. N., Kokorin O. YA., Petrov L. V. *Konditsionirovanie vozdukha i kholododnabzhenie* [Air conditioning and refrigeration supply], Moscow, Stroyizdat, 1985, 367 p.
22. Stefanov E. V. *Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha* [Ventilation and air conditioning], Leningrad, VVITKU, 1970, 399 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ольховский Дмитрий Владимирович¹ – инженер,
e-mail: demexez@gmail.com,
Зайцев Артем Вячеславович¹ – д-р техн. наук,
зав. сектором, e-mail: aerolog.artem@gmail.com,
Семин Михаил Александрович¹ – канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: mishkasemin@gmail.com,
¹ Горный институт Уральского отделения РАН.
Для контактов: Ольховский Д.В., e-mail: demexez@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.V. Olkhovskiy¹, Engineer,
e-mail: demexez@gmail.com,
A.V. Zaitsev¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Sector,
e-mail: aerolog.artem@gmail.com,
M.A. Semin¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
e-mail: mishkasemin@gmail.com,
¹ Mining Institute of Ural Branch,
Russian Academy of Science, 614007, Perm, Russia.
Corresponding author: D.V. Olkhovskiy, e-mail: demexez@gmail.com.

Получена редакцией 27.08.2021; получена после рецензии 30.09.2021; принята к печати 10.11.2021.
Received by the editors 27.08.2021; received after the review 30.09.2021; accepted for printing 10.11.2021.