

УДК 622.413:536.24

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА НА ТОЧНОСТЬ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Галкин А.Ф.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: afgalkin@yandex.ru

Целью работы являлось определение корректирующего коэффициента для оценки изменения температуры воздуха в конкретных точках сети горных выработок подземного сооружения при изменении расхода воздуха в них (при прочих равных условиях). На основе обработки данных численных расчетов получена простая аналитическая зависимость для определения корректирующего коэффициента. Проведено сравнение точности и степени надежности предлагаемого подхода к оценке изменения температуры в горных выработках при изменении в них расхода воздуха. В частности, показано, что предложенный подход позволяет получить достаточно достоверные данные для оценки изменения температуры в конкретной точке выработки, не прибегая к новым трудоемким расчетам и анализу данных. При этом степень погрешности данных, как правило, не превышает допустимых в инженерной практике значений. Причем возникающая ошибка относится в расчетный запас. Установлено, что корректирующий коэффициент в большей степени изменяется в зависимости от степени увеличения базового расхода воздуха, чем от собственно абсолютного значения базового расхода. При этом чем больше приведенная площадь участка выработки, тем допустимое значение степени увеличения базового расхода меньше, независимо от значения самого базового расхода воздуха. Установлено, что чем ниже базовая температура в конечной точке, тем влияние степени увеличения базового расхода на изменение температуры сильнее. Результаты вариантных расчетов представлены в виде 2D и 3D графиков, которые позволяют в широком диапазоне условий проветривания горных выработок подземных сооружений криолитозоны, характерных для золотодобывающих рудников, определить значения корректирующего коэффициента.

Ключевые слова: криолитозона, подземное сооружение, горная выработка, температура, прогноз, проветривание, ошибка вычисления

THE INFLUENCE OF AIR FLOW ON THE ACCURACY OF TEMPERATURE FORECAST IN THE MINE WORKINGS

Galkin A.F.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: afgalkin@yandex.ru

The work was carried out to determine the corrective coefficient for assessing the change in air temperature in the network of mine workings with a change in the air flow rate in them, other things being equal. Based on the processing of numerical calculations, a simple analytical dependence was obtained to determine the correction coefficient. Comparisons of the accuracy and reliability of the proposed approach to assessing the temperature change in mine workings when the flow rate changes in them air. In particular, it is shown that the proposed approach allows to obtain sufficiently reliable data to assess the temperature change at a particular point of production without resorting to new labor-intensive calculations and data analysis. At the same time, the degree of error of the data, as a rule, does not exceed the permissible in engineering practice. Moreover, the resulting error refers to the estimated stock. It is established that the correction coefficient changes to a greater extent depending on the degree of increase in the base air flow than on the actual absolute value of the base flow rate. The results of variant calculations are presented in the form of 2D and 3D graphs, which allow to determine the values of the corrective coefficient in a wide range of conditions for ventilation of the cryolithozone mine, characteristic of gold mines.

Keywords: cryolithozone, underground structure, mining, temperature, forecast, ventilation, calculation error

Тепловой режим горных выработок подземных сооружений криолитозоны, как горнодобывающего профиля (шахты и рудники) [1–3], так и другого назначения (подземные склады, холодильники, защитные объекты) [4–6] зачастую является определяющим фактором их надежности и безопасной эксплуатации. Это связано как с зависимостью прочностных свойств вмещающих мерзлых горных пород от температуры [7–9], так и существенным влиянием подземного микроклимата на комфортность и безопасность труда персонала подземных объектов [10–12]. При проектировании подземных сооружений уделяется особое внимание таким важным аспектам,

как прогноз температурного режима (определение глубины оттаивания) горных пород вокруг выработок и оценка закономерностей формирования теплового режима в основных воздухоподающих выработках и на рабочих местах [11–14]. Точность прогноза и надежность оценки во многом зависит от точности задания начальных условий [14, 15]. В частности, расхода воздуха в выработках и их геометрических характеристик – сечения, периметра и длины. Если для конкретной выработки геометрические характеристики точно задаются при проектировании и не изменяются при эксплуатации, то расход воздуха является переменной величиной в течение года. И его

реальные значения, например, в рудниках криолитозоны могут отличаться в разы. Это обусловлено действием естественной тяги, которая может существенно изменить всю проектную систему вентиляции рудника, вплоть до опрокидывания вентиляционной струи.

Цель настоящей работы – определение корректирующего коэффициента для оценки изменения температуры воздуха в конкретных точках сети горных выработок при изменении расхода воздуха в них (при прочих равных условиях).

Материалы и методы исследования

Для определения температуры воздуха в выработке после изменения базового расхода воздуха в «*k*» раз воспользуемся простой формулой

$$t_2 = qt_1, \quad (1)$$

где t_2 – температура после изменения расхода воздуха в выработке, °C; t_1 – температура при начальном (базовом) значении расхода воздуха, °C; q – корректирующий коэффициент, д.е.

Корректирующий коэффициент находится по формуле, полученной в результате обработки данных численных расчетов по прогнозу теплового режима на участке горной выработки:

$$q = \exp(f(1 - 1/k^{0,2})/Q^{0,2}), f = mlu/1000. \quad (2)$$

В формуле (2) приняты следующие обозначения: f – приведенная площадь поверхности участка выработки, $m^{0,6}/c^{0,2}$; u – периметр выработки на участке, м; l – длина участка выработки, м; m – коэффициент, зависящий от формы и вида крепи выработки, д.е.; k – степень изменения расхода воздуха, д.е.; Q – базовый расход воздуха в выработке, m^3/c .

Используя формулы (1) и (2), можно оценить степень изменения температуры воздуха в зимний период в конце отдельной горной выработки при изменении расхода воздуха, не прибегая к трудоемким расчетам.

Представляет интерес оценить ошибку, возникающую при определении температуры в конечной точке при изменении расхода воздуха в выработке. Относительная процентная ошибка может быть определена по формуле

$$\varepsilon = 100abs(1 - q). \% \quad (3)$$

Допустимая в инженерной практике ошибка вычисления искомой величины со-

ставляет обычно менее 10% или 0,1. Используя это допущение, из формулы (3), при подстановке в нее формулы (2), после несложных преобразований получена зависимость для определения соотношения между базовой величиной расхода воздуха и степенью его изменения для конкретной выработки:

$$k \geq 1/(1 - 0,095Q^{0,2}/f)^5. \quad (4)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Прежде всего, необходимо отметить, что при изменении расхода воздуха тепловой баланс выработки остается практически постоянным. Так как увеличение количества холода, накапливаемого породами в холодный период года, будет компенсироваться увеличением количества тепла, накапливаемого в теплый период года. Небольшая разница будет возникать только за счет того, что коэффициент теплоотдачи в зимний период незначительно больше, чем в летний [12]. Кроме того, простой анализ формулы (2) показывает, что зависимость корректирующего коэффициента от расхода воздуха имеет степенной характер с показателем степени, равным 0,2. Это означает, что увеличение базового расхода воздуха (до корректировки схемы проветривания рудника), например в 1,5 раза, приведет к изменению множителя в 1,08 раза. И, как следует из формулы, собственно корректирующий коэффициент составит 1,02 (при базовом расходе 20 m^3/c и увеличении его до 30 m^3/c , например). Максимальное значение степени изменения расхода воздуха в выработках не превысит 2,0. Это соответствует корректирующему коэффициенту, равному 1,04. Таким образом, следует ожидать, что изменения температуры в конечных точках будут незначительны, даже при большой степени изменения базового расхода воздуха. Однако полностью подтвердить данное утверждение возможно только всесторонним количественным анализом. Для этого по полученным формулам были проведены варианты расчетов, результаты которых приведены в виде графиков на рис. 1–5.

На рис. 1 показано изменение корректирующего коэффициента в зависимости от степени увеличения «*k*» базового расхода воздуха в выработке (взято два значения: 100 и 50 m^3/c) для различных значений параметра «*f*» – приведенной площади выработки.

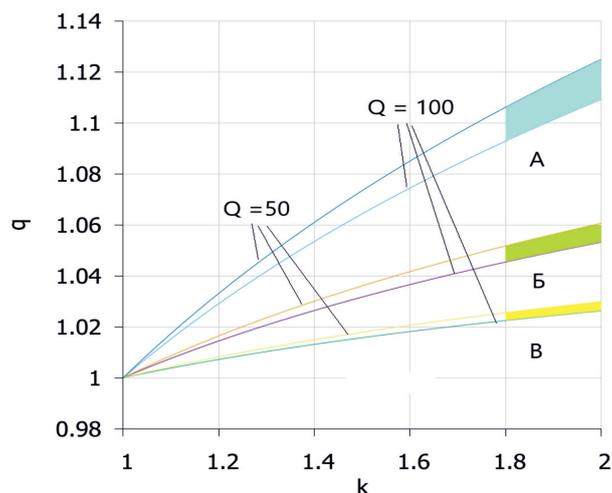


Рис. 1. Корректирующий коэффициент при базовом расходе 50 и 100 м³/с для различных участков выработки с приведенной площадью: А – 2,0; Б – 1,0; В – 0,5

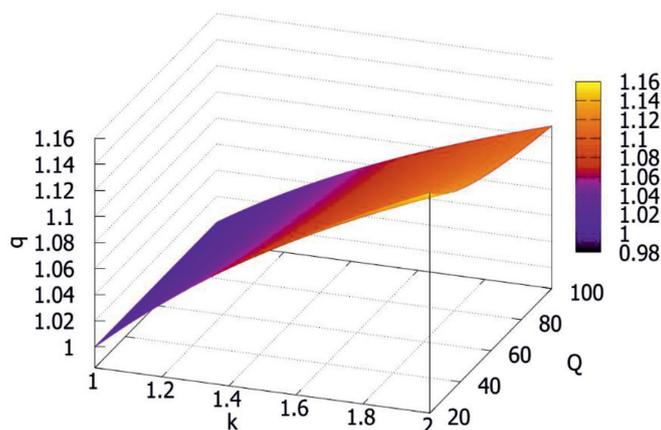


Рис. 2. Изменение корректирующего коэффициента в зависимости от степени увеличения Q

Как видно из графиков, приведенных на рисунке, увеличение базового расхода воздуха в два раза (с 50 до 100 м³/с) приводит к незначительному увеличению корректирующего коэффициента. Приведенная площадь играет более значимую роль, хотя в абсолютном значении эти цифры не очень велики. Например, изменение приведенной площади в 2 раза (с 1 до 2 – кривые А и Б) приводят к увеличению корректирующего коэффициента в 1,05 раза. А, при изменении приведенной площади в те же 2 раза (с 0,5 до 1 – кривые В и Б) приводят к увеличению корректирующего коэффициента в 1,02 раза. Но если сравнивать кривые А, Б и В, то очевидно влияние приведенной площади на корректирующий коэффициент:

чем меньше приведенная площадь, тем кривые более пологие. То есть степень изменения корректирующего коэффициента при постоянном значении увеличения базового расхода, независимо от его величины, возрастает при увеличении приведенной площади выработки. Если провести горизонтальную линию, параллельную оси Х на отметке корректирующего коэффициента, равной 1,1, то получим, что при базовом расходе меньше 100 м³/с и изменении приведенной площади менее 2, увеличение расхода воздуха меньше, чем в 1,65 раза не приведет к ошибке в определении температуры больше допустимой в инженерной практике. Далее мы рассмотрим это вопрос более детально. На рис. 2 приведено из-

менение корректирующего коэффициента в зависимости от степени увеличения базового расхода воздуха для участка выработки с приведенной площадью, равной 2,0.

Как видно из рисунка, корректирующий коэффициент в большей степени изменяется в зависимости от степени увеличения базового расхода воздуха, чем от собственно абсолютного значения базового расхода. Об этом свидетельствует разный наклон плоскости на рисунке относительно осей X («k») и Y («Q»). Причем, как уже отмечалось, абсолютные значения корректирующего коэффициента не очень велики и находятся вблизи или ниже значений, допустимой в инженерной практике ошибки вычислений.

Для наглядности на рис. 3 и 4 приведены графики изменения температуры в конечной точке при различной степени увеличения базового расхода для участка выработки с приведенной площадью, равной 2,0. На рис. 3 для базовой температуры, равной $-20,0^{\circ}\text{C}$, а на рис. 4 для базовой температуры, равной $-10,0^{\circ}\text{C}$.

Графики количественно подтверждают сделанный ранее очевидный вывод: чем ниже базовая температура в конечной точке, тем влияние степени увеличения базового расхода на изменение температуры сильнее. Причем это относится в большей степени к коэффициенту увеличения расхода воздуха, а не собственно абсолютному значению базового расхода.

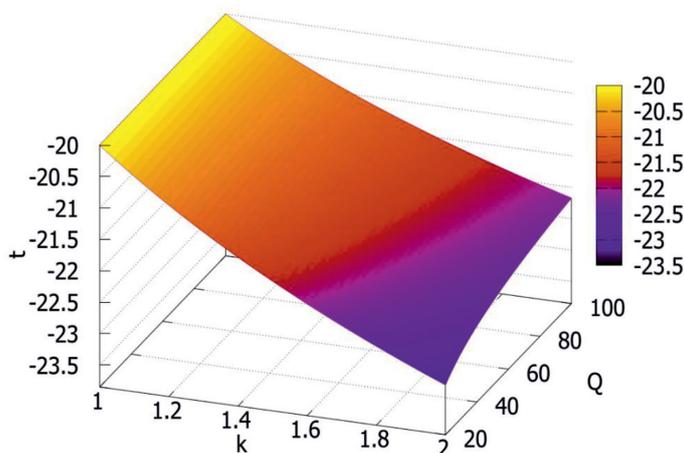


Рис. 3. Изменение температуры ($-20,0^{\circ}\text{C}$) при различной степени увеличения базового расхода для участка выработки с приведенной площадью, равной 2,0

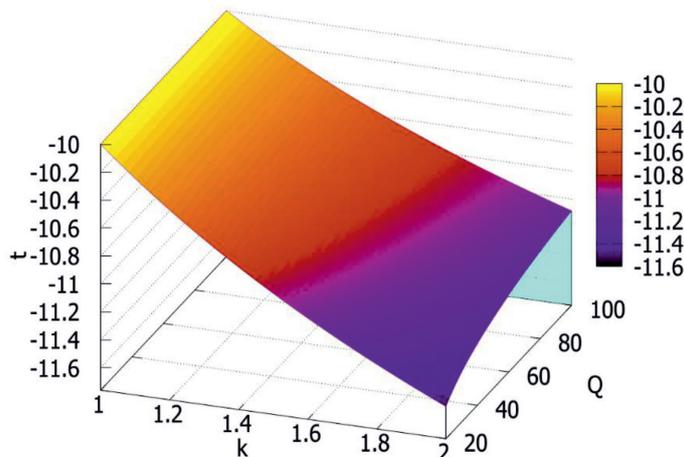


Рис. 4. Изменение температуры ($-10,0^{\circ}\text{C}$) при различной степени увеличения базового расхода для участка выработки с приведенной площадью, равной 2,0

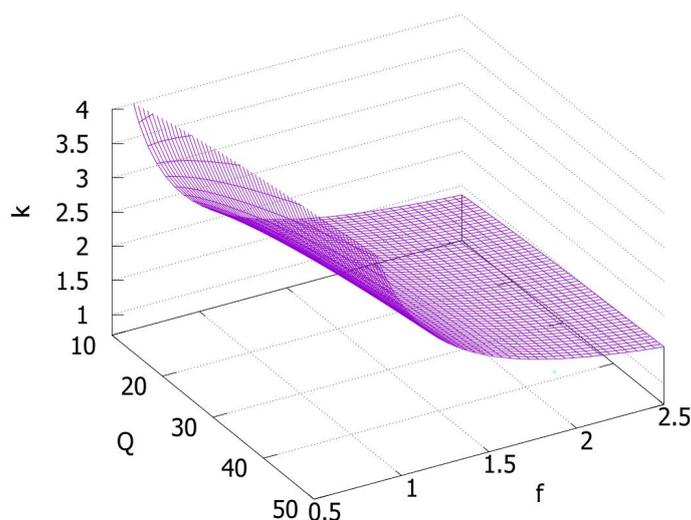


Рис. 5. Допустимое значение коэффициента увеличения базового расхода воздуха для участка выработки с различной приведенной площадью

На рис. 5 приведен график, характеризующий изменение допустимого значения коэффициента увеличения базового расхода воздуха для участка выработки с различной приведенной площадью.

Как видно из графика, чем больше приведенная площадь участка выработки, тем допустимое значение степени увеличения базового расхода меньше, независимо от значения самого базового расхода воздуха. Если значение коэффициента больше определенного по графику значения, то ошибка вычисления конечной температуры будет больше допустимой в инженерной практике (10%). Во всех остальных случаях она будет меньше, и проводить корректировку температурного режима на участке выработки необязательно.

Заключение

На основе обработки данных численных расчетов получена простая аналитическая зависимость для определения корректирующего коэффициента температуры в конечной точке участка выработки при изменении базового расхода воздуха. Проведено сравнение точности и степени надежности предлагаемого подхода к оценке изменения температуры в горных выработках при изменении в них расхода воздуха. Предложенный подход позволяет получить достаточно достоверные данные для оценки изменения температуры в конкретной точке выработки, не прибегая к новым трудоемким расчетам и повторному анализу данных. Показано,

что степень погрешности получаемых данных, как правило, не превышает допустимых в инженерной практике значений. Установлено, что корректирующий коэффициент в большей степени изменяется в зависимости от степени увеличения базового расхода воздуха, чем от собственно абсолютного значения базового расхода. При этом чем больше приведенная площадь участка выработки, тем допустимое значение степени увеличения базового расхода меньше, независимо от значения самого базового расхода воздуха. Результаты вариантных расчетов представлены в виде 2D и 3D графиков, которые позволяют в широком диапазоне условий проветривания горных выработок криолитозоны, характерных для золотодобывающих рудников, определить значения корректирующего коэффициента. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на сравнение результатов, полученных с помощью предложенного подхода с результатами, полученными с помощью численного прогноза значения температуры в конечной точке выработки при увеличении в ней базового расхода воздуха.

Список литературы / References

1. Скуба В.Н. Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1974. 118 с.
2. Scuba V.N. Research on the sustainability of mining in permafrost. Novosibirsk: Nauka, 1974. 118 p. (in Russian).
3. Шерстов В.А. Повышение устойчивости выработок россыпных шахт Севера. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1980. 56 с.

- Sherstov V.A. Increase in sustainability of the mining of the North. Novosibirsk, Nauka, 1980, 56 p. (in Russian).
3. Дядкин Ю.Д. Основы горной теплофизики. М.: Недра, 1968. 256 с.
- Dyadkin, Yu.D. Osnovy gornoj teplofiziki dlya shakht i rudnikov Severa (Basics of Mining Thermo physics for Underground Mines in the North), M.: Nedra, 1968, 256 p. (in Russian).
4. Кузьмин Г.П. Подземные сооружения в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2002. 176 с.
- Kuzmin G.P. Underground structures in the permafrost zone. Novosibirsk: Nauka, 2002. 176 p. (in Russian).
5. Галкин А.Ф., Курта И.В., Панков В.Ю. Сравнение теплового потока в горных выработках плоской и сферической симметрии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 10. С. 133–141.
- Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Comparison of heat flux in mine workings of flat and spherical symmetry // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2020. No. 10. P. 133–141 (in Russian).
6. Galkin A.F. Thermal conditions of the underground town collector tunnel. Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 8. P. 70–73.
7. Guo fang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. Temperature Effect on the Compressive Strength of Frozen Soils: A Review. Recent Advances in Geotechnical Research, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. 2019. P. 227–236. DOI: 10.1007/978-3-319-89671-7_19.
8. Teng J., Shan F., He Z., Zhang S., Sheng D. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. Géotechnique. 2018. P. 208–225. DOI: 10.1680/jgeot.17.P.208.
9. Семин М.А., Бровка Г.П., Пугин А.В., Бублик С.А., Желнин М.С. Исследование влияния неоднородности поля температур на прочность ледопородных ограждений стволов шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 9. С. 79–93.
- Semin M.A., Brovka G.P., Pugin A.V., Bublik S.A., Zhelnin M.S. Effects of temperature field nonuniformity on strength of frozen wall in mine shafts // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2021. No. 9. 79–93 (in Russian).
10. Greth A., Roghanchi P., Kocsis K. A review of cooling system practices and their applicability to deep ad hot underground US mines. 16th North American Mine Ventilation Symposium, Golden, CO, June 17–22. 2017. Vol. 11. P. 1–9.
11. Вернигор В.М., Морозов К.В., Бобровников В.Н. О подходах к проектированию теплового режима рудников в условиях многолетнемерзлых пород // Записки Горного института. 2013. Т. 205. С. 139–140.
- Vernigor V.M., Morozov K.V., Bobrovnikov V.N. About approaches to designing the thermal regime of mines in permafrost // Zapiski Gornogo instituta. 2013. Vol. 205. P. 139–140 (in Russian).
12. Галкин А.Ф. Тепловой режим рудников криолитозоны // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 377–381. DOI: 10.18454/pmi.2016.3.377.
- Galkin A.F. Thermal regime of cryolithozone mines // Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol. 219. P. 377–381 (in Russian). DOI: 10.18454/pmi.2016.3.377.
13. Галкин А.Ф., Курта И.В. Влияние температуры на глубину оттаивания мерзлых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 2. С. 82–91. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.
- Galkin A.F., Kurta I.V. Effect of temperature on thawing depth frozen rocks // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2020. No. 2, P. 82–91 (in Russian) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.
14. M. Zeeshan Khalid, M. Zubair, Majid Ali. An analytical method for the solution of two phase Stefan problem in cylindrical geometry // Applied Mathematics and Computation. 2019. Vol. 342. P. 295–308.
15. Горелик Я.Б., Паздерин Д.С. Корректность постановки и решения теплотехнических задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 3. С. 49–59.
- Gorelik Ya.B., Pazderin D.S., Correctness of formulation and solution of thermomechanical problems in forecasting temperature field dynamics in the foundations of constructions on permafrost // Kriosfera Zemli. 2017. V. XXI. No. 3. P. 49–59.