

ГОРНОЕ ДЕЛО

DOI: 10.15593/2224-9923/2014.10.9

УДК 622.4

© Казаков Б.П., Зайцев А.В., 2014

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ

Б.П. Казаков, А.В. Зайцев

Горный институт Уральского отделения
Российской академии наук, Пермь, Россия

Рассмотрена тема формирования теплового режима горных выработок глубоких рудников, являющаяся актуальной в связи с современной тенденцией углубления горных работ и возникновением трудностей нормализации микроклимата в горных выработках глубоких рудников.

Цель – исследование теплофизических процессов, протекающих в рудничной атмосфере и породном массиве, и их влияния на формирование микроклиматических параметров воздуха в горных выработках. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: установлены основные процессы, формирующие тепловой режим глубоких рудников, проведено их экспериментальное и теоретическое исследование.

В результате проведенной работы разработана и программно реализована математическая модель нестационарного сопряженного теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом, определено влияние тепловыделений от горных машин и твердеющих закладочных массивов на формирование температуры рудничного воздуха. Для прикладного использования результатов исследований произведена их программная реализация в виде модуля теплогазодинамического расчета программно-вычислительного комплекса «АэроСеть», обладающего удобным графическим интерфейсом для построения топологии вентиляционной сети, определения параметров источников тепловыделения, теплофизических и аэродинамических параметров расчета.

Ключевые слова: глубокие рудники, горные выработки, тепловой режим, гидростатическое сжатие, теплообмен, математическое моделирование, породный массив, источники тепловыделения, кондиционирование воздуха, микроклимат, закладочный массив, программно-вычислительный комплекс.

STUDY OF THE FORMATION OF THERMAL REGIMES IN DEEP MINES

B.P. Kazakov, A.V. Zaitsev

Mining Institute of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

The theme of thermal regime formation in the deep mine workings, which is relevant in connection with the modern trend of mining operations deepening and the occurrence of microclimate normalization difficulties in deep mine workings.

Purpose – investigation of thermal processes occurring in the mine atmosphere and the rock mass, and their influence on the air microclimatic parameters formation in mine workings. To achieve this goal following tasks were accomplished: the main processes forming the thermal regime of deep mines were established, their experimental and theoretical study was conducted.

As a result of this work a mathematical model of unsteady conjugate heat transfer between the mine air and rock masses has been developed and implemented as software, the effect of radiant energy of mining machines and hardening stowing arrays on the mine air temperature formation. For application of the results of research their program implementation was performed as a heat gasdynamic calculation module of software and computing complex "AeroSet", which has a user-friendly graphical interface for building ventilation network topology, determining the parameters of heat release sources, thermal and aerodynamic parameters of the calculation.

Keywords: deep mines, mining, thermal regime, hydrostatic compression, heat transfer, mathematical modeling, the rock mass, heat release sources, air conditioning, microclimate, filling mass, software and computing complex.

Современное развитие горных работ, поддержание и увеличение мощности добычи зачастую сопряжено с необходимостью ввода в отработку все новых, глубокозалегающих запасов. Углубление фронта горных работ ведет к принципиально новым проблемам, связанным с рудничной вентиляцией и горной теплофизикой. Одна из них – это возрастание температуры горного массива и сложности обеспечения требуемых микроклиматических параметров в горных выработках, в частности нормативно требуемой температуры воздуха 26 °С [1].

Особую сложность представляет нормализация микроклимата в условиях глубоких рудников, т.е. в тех случаях, когда естественная температура горного массива начинает достигать значения 26 °С (как правило, данное значение температуры характерно для глубины ведения горных работ 800–850 м и больше)¹ [2, 3].

Решение возникающих задач при этом требует разработки совершенно новых инструментов исследования и подходов и приобретает особую важность на этапе проектирования горнотехнических решений по отработке запасов глубоких рудников [4, 5, 6].

В результате проведенных термовлажностных съемок на ряде глубоких рудников выявлены следующие основные факторы формирования теплового режима глубоких рудников:

- гидростатическое сжатие воздуха в вертикальных и наклонных горных выработках [7];
- теплообмен между рудничным воздухом и породным массивом [8];
- тепловыделения техногенных источников [9].

В данной работе разработана математическая, алгоритмическая основа программных средств прогноза теплового

режима глубоких шахт и рудников с учетом следующих специфических особенностей:

- влияние гидростатического нагрева/охлаждения воздуха на его температуру при движении по наклонным и вертикальным горным выработкам;
- влияние силы давления на нагрев/охлаждение воздуха при теплообменных процессах;
- двухслойной структуры породного массива, позволяющей рассматривать систему воздух – крепь – массив;
- влияние процессов конденсации/испарения влаги из воздуха [10].

Математическая постановка задачи нестационарного сопряженного теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом осуществлялась следующим образом. Дифференциальное уравнение баланса тепла в породном массиве имеет вид

$$\frac{dU_m}{dt} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} d\sigma,$$

где U_m – внутренняя энергия элемента породного массива, Дж; T_m – тепловой поток в массиве, Вт/м²; $d\sigma$ – дифференциал поверхности площади теплообмена, м²; λ_m – теплопроводность горных пород.

Дифференциальное уравнение баланса тепла в рудничном воздухе имеет вид

$$\frac{dU_a}{dt} = -\alpha(T - T_a)d\sigma + \frac{mRt}{M\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{dP}{dt} \right), \quad (1)$$

где U_m – внутренняя энергия рудничного воздуха, Дж; α – коэффициент теплоотдачи на границе рудничный воздух – породный массив, Вт/м²; T – температура породного массива стенки выработки, °С; T_a – температура воздуха, °С; M – молярная масса воздуха, кг/моль; R – универсальная газовая постоянная; ρ – плотность воздушной среды, кг/м³.

¹ СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М.: Изд-во стандартов, 1999. 67 с.

Дифференциальные уравнения дополнялись граничными и начальными условиями. На внешней границе породного массива, определяемой радиусом теплового влияния, задается естественная температура породного массива (с учетом геотермического градиента).

Для верификации разработанных моделей проведено сопоставление экспериментальных и расчетных температур воздуха в воздухоподающих и вентиляционных глубоких стволах рудников

«Скалистый» и «Октябрьский». Результаты приведены на рис. 1 и 2.

Характерной особенностью рассчитанных графиков, подтверждающей экспериментальными измерениями, является линейный закон изменения температуры воздуха по глубине ствола.

Этот факт объясняется быстрым формированием тепловыравнивающей рубяки и снижением удельного влияния теплообмена на температуру воздуха [11].

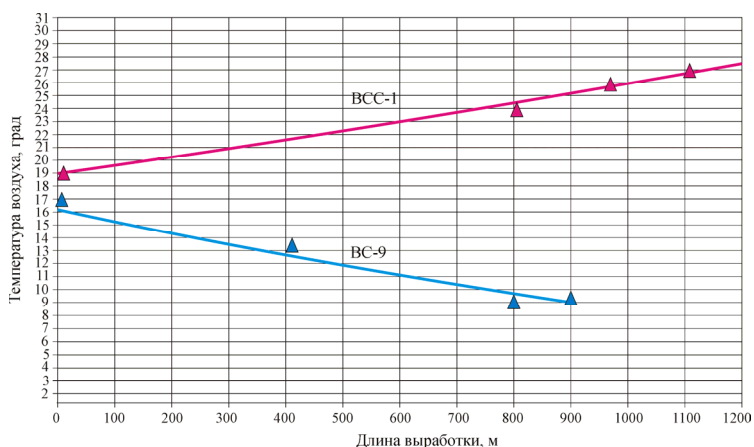


Рис. 1. Расчетный график изменения температуры воздуха и измеренные значения в створах рудника «Скалистый»: ▲ – замеры температуры воздуха в стволе ВСС-1; ▲ – замеры температуры воздуха в стволе ВС-9

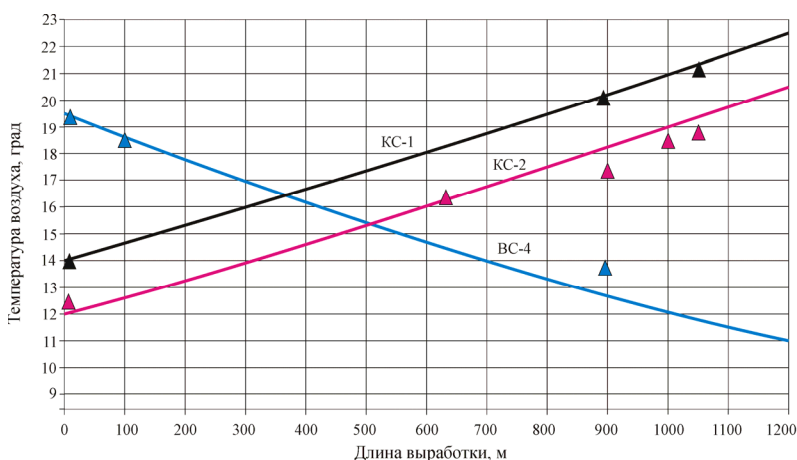


Рис. 2. Изменения температуры воздуха и измеренные значения в створах рудника «Октябрьский»: ▲ – замеры температуры воздуха в стволе КС-1; ▲ – замеры температуры воздуха в стволе КС-2; ▲ – замеры температуры воздуха в стволе ВС-4

Полученные результаты показывают удовлетворительную сходимость численных и экспериментальных результатов, что доказывает корректность разработанных математических моделей сопряженного теплообмена.

Наглядно зависимости нагрева воздушной струи от мощности тепловыделения приводом горной машины и расхода воздуха в выработке представлены на рис. 3.

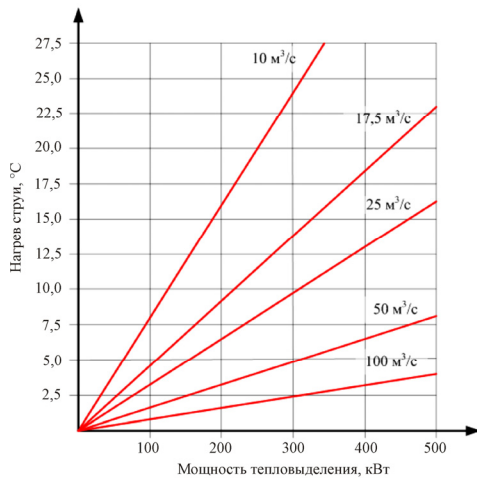


Рис. 3. Зависимости нагрева воздушной струи от расхода воздуха и мощности тепловыделения горной машины

Из полученных результатов следует, что локально в горных выработках работа машин с ДВС может приводить к значительному увеличению температуры воздуха и способствовать формированию некомфортных условий труда [12].

Найдя из последнего выражения время и подставляя разность температур из выражения (1), получим

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{S \lambda_{\sigma} c_{\text{закл}}}$$

При этом если полученная величина много больше времени закладки отдельной камеры, то при расчете теплового режима можно увеличивать естественную температуру массива на

рассчитанную величину прироста температуры. Таким образом, при расчете теплораспределения в вентиляционной сети закладочный массив является носителем источником тепла, аналогичным породному массиву. Иными словами, нагрев воздуха от закладочного массива происходит в результате процесса теплоотдачи массив – воздух [13].

В таком случае оценку возрастания температуры всего закладочного материала в камере можно осуществить по формуле

$$\Delta T = \frac{L\Psi\rho V}{c_{\text{закл}}\rho V} = \frac{L\Psi}{c_{\text{закл}}}$$

где $c_{\text{закл}}$ – теплоемкость закладочного массива, Дж/°C·кг.

Для того, чтобы была возможность использования разработанных математических моделей на практике, произведена их программная реализация в виде модуля теплогазодинамического расчета программно-вычислительного комплекса «АэроСеть», который имеет удобный графический интерфейс для построения топологии вентиляционной сети, определения параметров источников тепловыделения, теплофизических и аэродинамических параметров расчета (рис. 4).

Параметры численного расчета, общие теплофизические характеристики модели и результаты расчета задаются в окне теплогазодинамического расчета (рис. 5).

Таким образом, модуль теплогазодинамического расчета ПВК «АэроСеть» позволяет производить расчет сопряженной задачи распределения аэродинамических и термодинамических параметров рудничного воздуха в сетевой постановке с учетом задания в вентиляционной сети местных источников теплообмена.

Разработанное программное обеспечение позволяет решать две основные

задачи при устранении проблем нормализации микроклиматических условий:

– расчет теплового режима глубоких шахт и рудников с учетом их специфических особенностей;

– производить имитационное моделирование эффективности проведения горно- и теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима.

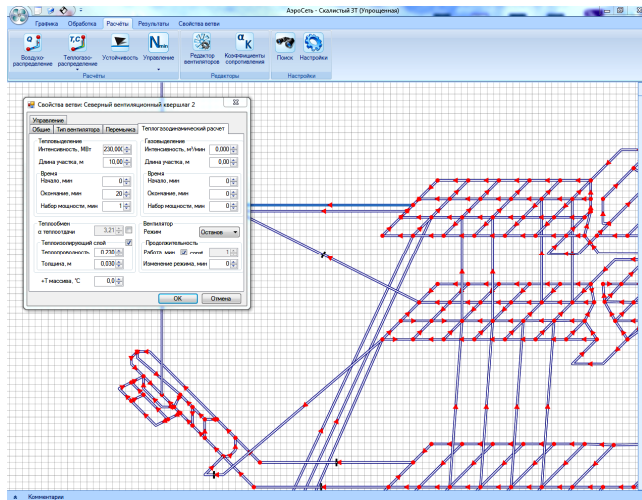


Рис. 4. Рабочее окно ПВК «АэроСеть» для построения топологии вентиляционной сети и определения параметров ТГД-расчета для каждого ее элемента

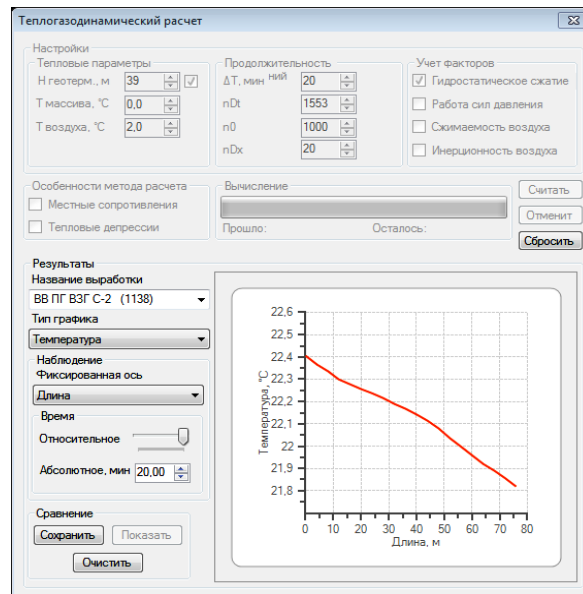


Рис. 5. Рабочее окно модуля ТГД-расчета ПВК «АэроСеть»

Список литературы

1. Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В., Тимофеевский Л.С. Горная теплофизика (Регулирование теплового режима шахт и рудников) – Л.: Изд-во Ленингр. гос. ин-та им. Г.В. Плеханова, 1976. – 96 с.
2. Луговский С.И. Проветривание глубоких рудников. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 324 с.
3. Шувалов Ю.В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: Ресурсосберегающие системы. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. – 196 с.
4. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2 т. – Киев: Изд-во Акад. наук Украин. совет. социал. респ., 1959. – Т. 1. – 430 с.
5. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2 т. – Киев: Изд-во АН УССР, 1960. – Т. 2. – 347 с.
6. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
7. Гендлер С.Г. Особенности тепловых расчетов горных выработок при системах разработки с твердеющей закладкой // Изв. вузов. Горный журнал. – 1981. – № 11. – С. 19–23.
8. Гендлер С.Г. Тепловой режим подземных сооружений. – Л.: Изд-во Ленингр. гос. ин-та им. Г.В. Плеханова, 1987. – 102 с.
9. Гончаров С.А., Дмитриев А.П. Термодинамические процессы в горных породах. – М.: Недра, 1990. – 360 с.
10. McPherson M.J. Subsurface ventilation engineering. – 2007. – 512 p.
11. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways // International Journal of Mining and Geological Engineering. – 1986. – Vol. 4. – P. 165–196.
12. Lambrechts J. The estimation of ventilation air temperatures in deep mines // J. Chem. Met. and Min. Society of South Africa. – 1950. – Vol. 51, № 8. – P. 15–20.
13. Ramsden R., Sheer T.J., Butterworth M.D. Design and Simulation of Ultra-Deep Mine Cooling Systems // Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress. – Poland, 2001. – P. 755–760.

References

1. Diad'kin Yu.D., Shuvalov Yu.V., Timofeevskii L.S. Gornaia teplofizika (Regulirovanie teplovogo rezhima shakht i rudnikov) [Mining Thermophysics (Regulation thermal condition mines and pits)]. Leningrad: Leningradskii gosudarstvennyi institut imeni G.V. Plekhanova, 1976. 96 p.
2. Lugovskii S.I. Provetrivanie glubokikh rudnikov [Aeration of deep mines]. Moscow: Gosgortekhizdat, 1962. 324 p.
3. Shuvalov Yu.V. Regulirovanie teplovogo rezhima shakht i rudnikov Severa: Resursosberegaiushchie sistemy [Heat condition control mines and pits North: Resource saving System]. Leningrad: Leningradskii universitet, 1988. 196 p.
4. Shcherban' A.N., Kremnev O.A. Nauchnye osnovy rascheta i regulirovaniia teplovogo rezhima glubokikh shakht [Scientific bases of calculation and control of the thermal regime of deep mines]. Kiev: Akademya nauk Ukrainskoi sovetskoi sotsialisticheskoi respubliky, 1959, vol. 1. 430 p.
5. Shcherban' A.N., Kremnev O.A. Nauchnye osnovy rascheta i regulirovaniia teplovogo rezhima glubokikh shakht [Scientific bases of calculation and control of the thermal regime of deep mines]. Kiev: Akademya nauk Ukrainskoi sovetskoi sotsialisticheskoi respubliky, 1960, vol. 2. 347 p.
6. Shcherban' A.N., Kremnev O.A., Zhuravlenko V.Ia. Rukovodstvo po regulirovaniu teplovogo rezhima shakht [Guidelines for regulating the thermal regime of mines]. Moscow: Nedra, 1977. 359 p.
7. Gendler S.G. Osobennosti teplovykh raschetov gornykh vyrabotok pri sistemakh razrabotki s tverdeiushchei zakladkoi [Features thermal calculations for systems of mining development with hardening laying]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 1981, no. 11, pp. 19–23.
8. Gendler S.G. Teplovoi rezhim podzemnykh sooruzhenii [Thermal regime of underground structures]. Leningrad: Leningradskii gosudarstvennyi institut imeni G.V. Plekhanova, 1987. 102 p.
9. Goncharov S.A., Dmitriev A.P. Termodinamicheskie protsessy v gornykh porodakh [Thermodynamic processes in rocks]. Moscow: Nedra, 1990. 360 p.
10. McPherson M.J. Subsurface ventilation engineering. 2007. 512 p.

11. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1986, vol. 4, pp. 165–196.
12. Lamberechts J. The estimation of ventilation air temperatures in deep mines. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 1950, vol. 51, no. 8, pp. 15–20.
13. Ramsden R., Sheer T.J., Butterworth M.D. Design and Simulation of Ultra-Deep Mine Cooling Systems. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. Poland, 2001, pp. 755–760.

Об авторах

Казakov Борис Петрович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом аэрологии и теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614000, г. Пермь, ул. Сибирская, 78 А; e-mail: aero_kaz@mail.ru).

Зайцев Артем Вячеславович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614000, г. Пермь, ул. Сибирская, 78 А; e-mail: aerolog.artem@gmail.com).

About the authors

Boris P. Kazakov (Perm, Russian Federation) – doctor of technical sciences, professor, head of the aerology and thermophysics department of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614007, Perm, Sibirskaya st., 78 A; e-mail: aero_kaz@mail.ru).

Artem V. Zaitsev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in technical sciences, research associate of the aerology and thermophysics department of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614007, Perm, Sibirskaya st., 78 A; e-mail: aerolog.artem@gmail.com).

Получено 05.02.2014