

ГОРНОЕ ДЕЛО

DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.5

УДК 622.44:622.454

© Шалимов А.В., Кормщиков Д.С.,
Газизуллин Р.Р., Сёмин М.А., 2014

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫХ ДЕПРЕССИЙ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ПРОВЕТРИВАНИЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

А.В. Шалимов, Д.С. Кормщиков, Р.Р. Газизуллин, М.А. Сёмин

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь, Россия

Актуальность представленных в работе результатов теоретических исследований определяется необходимостью создания, уточнения и совершенствования методов прогнозирования изменений воздухораспределения и параметров рудничного воздуха во время аварий. Проведен анализ взаимосвязи аэрологических и теплофизических процессов, протекающих в горных выработках. Показано, что связующим звеном между ними являются тепловые депрессии, влияние которых на проветривание возрастает во время рудничных аварий, связанных с пожарами и отключениями главных вентиляционных установок. Смоделированы изменения термодинамических свойств воздушного потока под действием процессов гравитационного сжатия и разрежения в стволах. Представлено решение задачи сопряженного теплообмена вентиляционного воздуха с породным массивом в приближении малых времен, позволяющее прогнозировать динамику тепловых депрессий во время пожара. Приведены результаты численного моделирования изменений движения воздуха по уклону при возникновении пожаров различной мощности. Результаты математического моделирования аэро- и теплогазодинамических процессов, протекающих в аварийных режимах проветривания, являются основой для разработки комплекса мероприятий, направленных как на предотвращение возникновения аварий, так и на управление аварийным проветриванием в реальном времени.

Ключевые слова: аэрологические и теплофизические процессы, тепловые депрессии, теплообмен, давление, температуропроводность, естественная тяга, главная вентиляционная установка, рудничный пожар, породный массив, теплосодержание, коэффициент нестационарного теплообмена, коэффициент теплоотдачи, гидростатическое сжатие, преобразования Лапласа, функции Бесселя, устойчивость.

MODELING ALTERATION OF THERMAL DROP OF VENTILATION PRESSURE AND ITS EFFECTS ON MINE WORKING VENTILATION

A.V. Shalimov, D.S. Kormshchikov, R.R. Gazizullin, M.A. Semin

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

Topicality of the theoretical study results is determined by a need to develop, correct and improve the methods to forecast changes in air distribution and parameters of mine air in case of emergency. An analysis is made of relation between aerological and thermalphysic processes in mine workings. It is shown that the link between them is in thermal drop of ventilation pressure which influence on ventilation grows during mine emergency leading to fire and the main fan unit failure. Alteration of thermodynamic properties of air flow under gravitational contraction and stack effect in shafts was modeled. A solution is given to the problem of coupled heat transfer of ventilation air with rock mass using the short-time approximation, allowing forecast of thermal drops of ventilation pressure during the fire. The results of numerical simulation of air movement evolution inside the inclined shafts during the fire of different scale are presented. The results of mathematical simulation of aero- and thermal-gas-dynamic processes occurring in emergency ventilation mode lay foundation for development of a complex of measures aimed at emergency prevention and real-time emergency ventilation control.

Keywords: aerological and thermalphysic processes, thermal drop of ventilation pressure, heat transfer, pressure, thermal diffusivity, natural draught, main fan unit, mine fire, rock mass, heat content, unsteady heat transfer coefficient, heat-transfer coefficient, hydrostatic compression, Laplace transforms, Bessel functions, stability.

Теплофизические процессы, протекающие при движении вентиляционного воздуха, меняющие его термодинамические характеристики – температуру, давление, плотность и влажность, играют важную роль в формировании рудничного микроклимата. Под действием этих процессов изменяются и другие свойства воздуха, например загазованность и запыленность, которые уменьшаются при увлажнении воздуха. Скорость движения воздуха по выработкам, определяющая интенсивность протекания теплофизических процессов, зависит от них же через тепловые депрессии, возникающие в негоризонтальных выработках. Взаимозависимость этих процессов и свойств рудничного воздуха определяет необходимость комплексного моделирования динамики тепловых депрессий с целью прогнозирования возможных изменений микроклиматических параметров воздуха и недопущения возникновения неблагоприятных условий для проведения горных работ.

Расход воздуха как основной объект изучения рудничной аэрологии является в теплофизике заданным параметром при исследовании протекающих в нем термодинамических процессов. В большинстве случаев вентиляционные задачи решаются в следующем порядке: сначала решается аэрологическая задача, т.е. определяется воздухораспределение, затем для известных расходов воздуха решается теплофизическая задача, связанная с определением изменения термодинамических параметров воздуха. Однако в некоторых случаях такой подход «аэрология → теплофизика» неприемлем по причине возникновения обратной зависимости, когда термодинамические процессы начинают влиять на воздухораспределение. В этих случаях вентиляционная задача должна ставиться и решаться в общей постановке («аэрология ↔ теплофизика») без разделения на части. Подобные ситуации могут иметь место при больших перепадах темпера-

тур воздуха в стволах и негоризонтальных выработках, что является причиной возникновения тепловых депрессий, меняющих воздухораспределение. Например, в штатном режиме работы главной вентиляционной установки (ГВУ) на рудниках с одноуровневыми стволами величина тепловых депрессий в стволах (естественная тяга) невелика (порядка 5 %) по сравнению с депрессией ГВУ, и поэтому обратную связь при расчете естественной тяги можно не учитывать. Ситуация изменяется во время плановых отключений ГВУ, когда естественная тяга становится единственным двигателем проветривания, расчет интенсивности которого возможен только на основе общего подхода, учитывающего взаимовлияние теплофизических и динамических механизмов движения воздуха [1]. Необходимость в применении общего подхода к расчету вентиляции появляется также при моделировании движения воздуха в аварийных ситуациях, связанных с пожарами, когда возникающие тепловые депрессии сравнимы по величине с общешахтной депрессией в зоне возгорания [2].

Причина возникновения тепловых депрессий – неравенство плотностей воздуха в негоризонтальных выработках. Плотность воздуха ρ , кг/м³, является функцией его температуры T , °С, давления P , Па, и относительной влажности η , %, и определяется уравнением состояния [3]

$$\rho = \frac{29P - 0,11\eta(479 + (11,52 + 1,62T)^2)}{8314(T + 273)}. \quad (1)$$

Относительная влажность η предполагается заданной и неизменной, т.е. термодинамические свойства воздуха описываются уравнением состояния $\rho = \rho(T, P)$ в виде (1) с учетом эффектов совершения работы силами давления при нагревании или охлаждении воздуха и нагрева воздуха в стволах в результате его гидростатического сжатия под действием силы тяжести. Оба эффекта имеют

термодинамическую природу, обусловленную сжимаемостью воздуха, и оказывают воздействие на воздухораспределение в случаях отключения ГВУ или возникновения пожара.

Алгоритм расчета распространения тепла по выработкам рудника построен по аналогии с алгоритмом идеального вытеснения для распространения примесей, изложенного в работе [4]. Учет изменяющихся расходов воздуха заключается в том, что на каждом шаге по времени пересчитываются плотности воздуха, тепловые депрессии и воздухораспределение. Формула для пошагового перерасчета температур T и плотностей ρ воздуха получается из уравнения состояния (1) и закона сохранения энергии, записанного для перемещающегося элемента воздуха за один шаг по времени Δt , с:

$$\Delta Q = \Delta W + \Delta A, \quad (2)$$

т.е. тепло ΔQ из массива в воздух идет на увеличение его теплосодержания ΔW и совершение силами давления работы ΔA по расширению воздуха. При детализации входящих в (2) энергетических величин формула принимает вид

$$\frac{4\alpha\Delta t}{H}(T_m - T) = c_v\Delta T - P\frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·с·°С) [5], $\alpha = 3,4\frac{|v|(m/c)^{0,8}}{H(m)^{0,2}}$; H – поперечный размер выработки, м; T_m – температура массива на данной глубине, °С; c_v – объемная теплоемкость воздуха (Дж/(м³·°С)); v – скорость движения воздуха по выработке, м/с; ΔT и $\Delta\rho$ – изменения температуры и плотности элемента воздуха в процессе движения за время Δt .

Теперь изменение плотности $\Delta\rho$ может быть выражено через ΔT :

$$\Delta\rho = -\frac{4\alpha\rho\Delta t}{PH}(T_m - T) + \frac{\rho c_v\Delta T}{P}. \quad (4)$$

Также связь между ΔT и $\Delta\rho$ может быть получена дифференцированием уравнения состояния $\rho = \rho(P, T)$:

$$\Delta\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right)\Delta P + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)\Delta T. \quad (5)$$

Система уравнений (4)–(5) разрешается относительно неизвестных ΔT и $\Delta\rho$:

$$\Delta T = \frac{\frac{4\alpha\rho\Delta t}{H}(T_m - T) + \left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right)P\Delta P}{c_v\rho - P\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= \\ &= \frac{\frac{4\alpha\rho\Delta t}{H}(T_m - T)\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right) + c_v\rho\left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right)\Delta P}{c_v\rho - P\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Частные производные $\left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right)$ и $\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)$ в единицах (кг/м³)/Па и (кг/м³)/°С определяются из конкретного вида уравнения состояния (1):

$$\left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right) = \frac{29}{8314(T + 273)} > 0, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right) &= \\ &= -(29P - 28,87\eta(539,23 - T)) \times \\ &\times (7,45 + T) / (8314(T + 273)^2) < 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Относительно величины давления воздуха P в формулах (6), (7) и (9) следует заметить, что она зависит и от распределения плотности воздуха в вертикальных выработках, и от расхода воздуха, определяющего падение давления. Но учитывая, что абсолютное значение атмосферного давления ($\sim 10^5$ Па) значительно больше его изменений внутри рудника, процесс сжатия-расширения воздуха в руднике можно считать локально изобарическим и, во избежание появления нелинейности при расчете,

принять для давления P , Па, на глубине h , м, следующую зависимость:

$$P = P_0 + \rho_0 g h, \quad (10)$$

где P_0 , Па, и ρ_0 , кг/м³, – атмосферное давление и плотность воздуха на поверхности; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с². Это упрощение позволяет рассчитывать ρ непосредственно по формуле (1), не табулируя (7). По виду полученной зависимости (8) для вычисления температуры можно заключить, что слагаемое со знаком «+» в числителе, содержащее $\frac{\partial \rho}{\partial P}$, отвечает за гидростатический нагрев воздуха, а слагаемое со знаком «-» в знаменателе, содержащее $\frac{\partial \rho}{\partial T}$, учитывает то, что часть тепла при нагреве воздуха тратится на работу по его расширению.

Наряду с перечисленными механизмами важную роль в формировании тепловых депрессий играют техногенные источники выделения тепла [6] и теплообменные процессы рудничного воздуха с горными породами, исследованию которых посвящено множество работ разных авторов [7–9]. В основе большинства из них в различных модификациях заложена одна и та же физическая модель теплообмена [10], центральным звеном которой является понятие так называемого коэффициента нестационарного теплообмена k_t . Суть введения k_t – «увязать» основную характеристику процесса теплообмена – плотность потока тепла из воздуха в массив j – с известными значениями температур воздуха T и «непотребованного» массива T_∞ , т.е. $j = k_t(T_\infty - T)$. Если $k_t = k_t(t, z)$ становится известной функцией времени и координаты, то задача оказывается решенной для воздуха, поскольку известно, сколько тепла отнимается у воздуха в каждый момент времени в каждом месте, т.е. задача определения температуры воздуха при таком подходе сводится к задаче определения

k_t . В отличие от строгой постановки задачи сопряженного теплообмена двух сред (воздуха и массива) [11] подход этот привлекателен тем, что в большинстве случаев позволяет получить достаточно простые аналитические зависимости для расчета температуры воздуха.

Сравнительный анализ расчетных результатов показал, что в условиях больших перепадов температур и малых времен теплообмена метод k_t дает значительные количественные погрешности, что позволяет сделать вывод о «грубости» моделей теплообмена, основанных на коэффициенте нестационарного теплообмена, применительно к данным условиям. Для проверки и уточнения результатов при моделировании теплообмена рудничного воздуха с горным массивом при пожаре было решено использовать подход, предложенный в работе [12], заключающийся в точном численном решении задачи теплообмена в сопряженной постановке с помощью преобразований Лапласа. Для температуры T , °С, (отсчитывается от температуры «непотребованного» массива T_∞) воздуха как функции времени t (единица измерения t_0^2/χ_m порядка одного месяца) и координаты z (единица измерения – радиус выработки r_0 , м) в работе [13] был получен следующий результат (для коэффициента теплоотдачи, равного бесконечности):

$$T(t, z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} \tau_0(p) \exp\left\{\left(t - \frac{z}{a}\right)p - z \frac{b}{a} \sqrt{-p} \frac{J_1(\sqrt{-p}) \pm iN_1(\sqrt{-p})}{J_0(\sqrt{-p}) \pm iN_0(\sqrt{-p})}\right\} dp, \quad (11)$$

где $\tau_0(p) \equiv \int_0^{+\infty} T_0(t) e^{-pt} dt$, $a \equiv \frac{vr_0}{\chi_m}$,

$b \equiv \frac{2c_v^m}{c_v^a}$, T_0 – температура воздуха в начале выработки, °С, $T_0(t) = T(t, z = 0)$; χ_m – температуропроводность массива, м²/с;

v – скорость движения воздуха, м/с; c_v^m и c_v^a – объемные теплоемкости массива и воздуха, Дж/(°С·м³); J_0, N_0, J_1 и N_1 – функции Бесселя и Неймана нулевого и первого порядков; p – комплексный параметр; i – мнимая единица, интегрирование ведется вдоль любой прямой с вещественной координатой $s = \text{Re}(p)$, большей показателя роста функции T . Знаки выбираются: «+», если $\text{Im}(\sqrt{-p}) > 0$, и «-», если $\text{Im}(\sqrt{-p}) < 0$.

Вещественная часть аргумента функций Бесселя не должна быть слишком большой ($s \leq 10$), поскольку при расчете эти функции аппроксимируются степенными рядами. Это означает, что с помощью формулы (11) можно рассчитывать температуру воздуха спустя время $t \geq 0,1$ с начала теплообмена, что составляет примерно трое суток в размерных единицах. При уменьшении времени погрешность расчета интеграла быстро увеличивается по причине растущей неточности вычислений функций Бесселя. Таким образом, формула (11) позволяет получить точные результаты при временах свыше суток с начала теплообмена, а реальное время пожара на 1–2 порядка меньше.

Расчет изменения температуры воздуха во время пожара в течение малых времён с начала возгорания становится возможен, если воспользоваться асимптотическими разложениями функций Ганкеля 1-го и 2-го рода $H_n^{(1)}(\xi) \equiv J_n(\xi) + iN_n(\xi)$ и $H_n^{(2)}(\xi) \equiv J_n(\xi) - iN_n(\xi)$ при больших значениях аргумента ξ . Согласно [14]

$$H_0^{(1)}(\xi) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi\xi}} e^{i\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right)},$$

$$H_0^{(2)}(\xi) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi\xi}} e^{-i\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right)},$$

$$H_1^{(1)}(\xi) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi\xi}} e^{i\left(\xi - \frac{3\pi}{4}\right)},$$

$$H_1^{(2)}(\xi) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi\xi}} e^{-i\left(\xi - \frac{3\pi}{4}\right)}.$$

После подстановки (12) в (11) с учетом того, что $\frac{H_1^{(1)}(\xi)}{H_0^{(1)}(\xi)} = -i$ и $\sqrt{-p} = i\sqrt{p}$ при $\text{Im}(p) < 0$, а $\frac{H_1^{(2)}(\xi)}{H_0^{(2)}(\xi)} = i$ и $\sqrt{-p} = -i\sqrt{p}$ при $\text{Im}(p) > 0$ (для определенности считается, что $\text{Re}(\sqrt{-p}) > 0$ и $\text{Re}(\sqrt{p}) > 0$), получается

$$T(t, z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} \tau_0(p) \exp\left\{\left(t - \frac{z}{a}\right)p - z \frac{b}{a} \sqrt{p}\right\} dp \quad (13)$$

Формула (13) не содержит цилиндрических функций, пригодна для проведения тепловых расчетов с малыми временами t и является решением задачи сопряженного теплообмена в плоском слое. Действительно, если учесть, что в начале горения глубина проникновения тепла от горячего воздуха в стенки выработок невелика, т.е. мала по сравнению с их радиусом, то задача может быть представлена как плоская.

В качестве примера на рисунке представлены расчетные графики изменений расхода воздуха в наклонной выработке при возникновении в ней возгораний различной интенсивности тепловыделения. Видно, что, начиная с некоторой мощности источника тепла под действием растущей тепловой депрессии происходит опрокидывание идущей вниз по уклону струи воздуха, которое в рассматриваемом случае переходит в устойчивое «тепловое заклинивание» потока в выработке. В зависимости от условий

запирание может быть как устойчивым, так и неустойчивым и сменяться опрокидыванием [15].

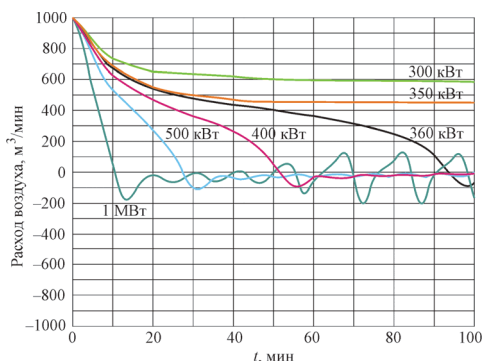


Рис. Изменение расхода воздуха по уклону в зависимости от интенсивности источника тепловыделения

Представленное решение задачи теплообмена вентиляционного воздуха и породного массива в сопряженной постановке в приближении малых времен с учётом термодинамических механизмов, обусловленных сжимаемостью воздуха в стволах, дает возможность моделировать динамику тепловых депрессий и изменения расходов и температуры рудничного воздуха в аварийных режимах проветривания, связанных с пожарами и отключениями ГВУ. Расчетные результаты моделирования движения воздуха, переноса тепла, дыма и газов во время аварий позволяют делать выводы относительно наиболее безопасных путей выхода людей на поверхность и способов скорейшей ликвидации аварий и их последствий [16, 17].

Список литературы

1. Казаков Б.П., Шалимов А.В. О возможности проветривания рудника естественной тягой после отключения главной вентиляционной установки // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 2. – С. 59–65.
2. Шалимов А.В. Численное моделирование газоздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимах проветривания рудников и шахт // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 84–92.
3. Богословский В.Н. Отопление и вентиляция. – М.: Стройиздат, 1976. – Ч. II. – С. 512.
4. Красносштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. Моделирование нестационарных процессов распространения газовых примесей по выработкам рудника в условиях рециркуляционного проветривания // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006. – № 1. – С. 95–101.
5. Ворopaев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966. – 219 с.
6. Казаков Б.П., Зайцев А.В., Шалимов А.В. Влияние закладочных работ на формирование теплового режима в горных выработках в условиях рудников ОАО «Норильский никель» // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 2. – С. 110–114.
7. Amano K., Mizuta V., Hiramatsu Y. An improved method of predicting underground climate // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. – 1982. – Vol. 19, № 1. – P. 31–38.
8. Blickensderfer R., Deardorffer D., Kelley J. Jendivity of Some Coal-Cutter Materials by Impact-Abrasion in Air-Methane // U.S. Bureau of Mines. Report of Investigations. – 1974. – № 7930. – P. 81–93.
9. Van Heerden C.A. A problem of unsteady heat flow in convection with air cooling of codifies // Proc. of the General Discussion on Heat Transfer / London. Inst. Mech. Engres. – 1951. – P. 283–285.
10. Кремнёв О.А. Теплообмен между вентиляционной струей и горными массивами старых шахт и выработок // Тр. Ин-та теплоэнергетики Акад. наук УССР. – 1954. – № 10.
11. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Численное решение сопряженной задачи теплораспределения в рудничной атмосфере и окружающем породном массиве для сети горных выработок произвольной топологии // Горн. инф.-аналит. бюл. – 2013. – № 8. – С. 176–180.
12. Kazakov B., Shalimov A. The connected task of non-stationary heat exchange between mine air and mining massif // Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress (Poland). – 2001. – P. 63–68.
13. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Теплообмен вентиляционного воздуха с крепью воздухоподводящего ствола и породным массивом / Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 92–100.
14. Соболев С.Л. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 444 с.
15. Gershuni G.Z., Myznikov V.M., Shalimov A.V. Plane-parallel advective binary mixture flow stability in a horizontal layer // International Journal Heat Mass Transfer. – 1994. – Vol. 37, № 15. – P. 2327–2342.
16. Кормщиков Д.С. Моделирование рудничных пожаров в программном модуле «Электронный план ликвидации аварий» // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5, № 1. – С. 159–161.
17. Гришин Е.Л., Кыряков А.С., Кормщиков Д.С. Моделирование аэротермодинамических процессов в программном модуле «План ликвидации аварий» // Горн. инф.-аналит. бюл. – 2012. – № 5. – С. 312–315.

References

1. Kazakov B.P., Shalimov A.V. O vozmozhnosti provetrvaniia rudnika estestvennoi tiagoi posle otklucheniia glavnoi ventilatsionnoi ustanovki [Possibility of mine ventilation by natural draught following the main air unit failure]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 59–65.
2. Shalimov A.V. Chislennoe modelirovanie gazo-vozdushnykh potokov v ekstremal'nykh situatsiiakh i avariinykh rezhimov provetrvaniia rudnikov i shakht [Numerical simulation of gas-air flows in extreme conditions and emergency ventilation of mines and shafts]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2011, no. 6, pp. 84–92.
3. Bogoslovskii V.N. Otoplenie i ventilatsiia [Heating and ventilation]. Moscow: Stroizdat, 1976, part. II, p. 512.
4. Krasnoshtein A.E., Kazakov B.P., Shalimov A.V. Modelirovanie nestatsionarnykh protsessov rasprostraneniia gazovykh primesei po vyrabotkam rudnika v usloviakh retsirkulatsionnogo provetrvaniia [Simulation of nonstationary processes of gas admixture diffusion in mine workings in recirculation ventilation]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2006, no. 1, pp. 95–101.

5. Voropaev A.F. Teoriia teploobmena rudnichnogo vozdukhа i gornykh porod v glubokikh shakhtakh [Theory of heat exchange of mine air and rocks in deep shafts]. Moscow: Nedra, 1966. 219 p.
6. Kazakov B.P., Zaitsev A.V., Shalimov A.V. Vlianie zakladochnykh работ na formirovanie teplovogo rezhima v gornykh vyrabotkakh v usloviakh rudnikov ОАО "Noril'skii nikel" [Influence of stowing operations on thermal conditions in mine workings at the mines operated by MMC Norilsk Nickel]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 2, pp. 110–114.
7. Amano K., Mizuta V., Hiramatsu Y. An improved method of predicting underground climate. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1982, vol. 19, no. 1, pp. 31–38.
8. Blickensderfer R., Deardorffer D., Kelley J. Incendivity of Some Coal-Cutter Materials by Impact-Abrasion in Air-Methane. *U.S. Bureau of Mines. Report of Investigations*, 1974, no. 7930, pp. 81–93.
9. Van Heerden C.A. A problem of unsteady heat flow in convection with air cooling of codifies. *Proc. of the General Discussion on Heat Transfer*. London Inst. Mech. Eng., 1951, pp. 283–285.
10. Kremnev O.A. Teploobmen mezhdu ventilatsionnoi struei i gornymi massivami starykh shakht i vyrabotok [Heat exchange between ventilation flow and rock mass of old shafts and workings]. *Trudy Instituta teploenergetiki Akademii nauk Ukrain'skoi SSR*, 1954, no. 10.
11. Levin L.Lu., Semin M.A., Zaitsev A.V. Chislennoe reshenie sopriazhennoi zadachi teplozaspredelenia v rudnichnoi atmosfere i okruzhaiushchem porodnom massive dlia seti gornykh vyrabotok proizvol'noi topologii [Numerical solution of adjoint problem of heat distribution in mine environment and surrounding rock mass for the working network of random topology]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii buil'teten'*, 2013, no. 8, pp. 176–180.
12. Kazakov B., Shalimov A.V. The connected task of non-stationary heat exchange between mine air and mining massif. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress (Poland)*, 2001, pp. 63–68.
13. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. Teploobmen ventilatsionnogo vozdukhа s krep'iu vozdukhopodaiushchego stvola i porodnym massivom [Heat exchange between ventilation air and intake shaft support and rock mass]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2011, no. 5, pp. 92–100.
14. Sobolev S.L. Uravneniia matematicheskoi fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1966. 444 p.
15. Gershuni G.Z., Myznikov V.M., Shalimov A.V. Plane-parallel advective binary mixture flow stability in a horizontal layer. *International Journal Heat Mass Transfer*, 1994, vol. 37, no.15, pp. 2327–2342.
16. Kormshchikov D.S. Modelirovanie rudnichnykh požarov v programmnom module "Elektronnyi plan likvidatsii avarii" [Simulation of mine fire in software module "Electronic breakdown elimination plan"]. *Nauchnye issledovaniia i inovatsii*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 159–161.
17. Grishin E.L., Kiriakov A.S., Kormshchikov D.S. Modelirovanie aerotermodinamicheskikh protsessov v programmnom module "Plan likvidatsii avarii" [Simulation of aerothermodynamic processes in software module "Breakdown elimination plan"]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii buil'teten'*, 2012, no. 5, pp. 312–315.

Об авторах

Шалимов Андрей Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, заведующий сектором Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: shalimovav@mail.ru).

Кормшиков Денис Сергеевич (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: dkormshchikov@gmail.com).

Газизуллин Руслан Рафаилович (Пермь, Россия) – инженер Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: aero_rus@mail.ru).

Семин Михаил Александрович (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: mishkasemin@gmail.com).

About the authors

Andrei V. Shalimov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Divisional Manager, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614000, Perm, Sibirskaya st., 78a; e-mail: shalimovav@mail.ru).

Denis S. Kormshchikov (Perm, Russian Federation) – Junior Scientist, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614000, Perm, Sibirskaya st., 78a; e-mail: dkormshchikov@gmail.com).

Ruslan R. Gazizullin (Perm, Russian Federation) – Engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614000, Perm, Sibirskaya st., 78a; e-mail: aero_rus@mail.ru).

Mikhail A. Semin (Perm, Russian Federation) – Junior Scientist, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614000, Perm, Sibirskaya st., 78a; e-mail: mishkasemin@gmail.com).

Получено 01.08.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Шалимов А.В., Кормшиков Д.С., Газизуллин Р.Р., Семин М.А. Моделирование динамики тепловых депрессий и ее влияния на проветривание горных выработок // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2014. – № 12. – С. 41–47. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.5.

Please cite this article in English as:

Shalimov A.V., Kormshchikov D.S., Gazizullin R.R., Semin M.A. Modeling alteration of thermal drop of ventilation pressure and its effects on mine working ventilation. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no. 12, pp. 41–47. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.5.